

Avaliação de aglomerados de cortiça para absorção de energia em equipamentos de segurança passiva

Nuno Miguel da Silva Moreira Bastos

Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Doutor Nuno Correia

Orientador na FEUP: Professor Doutor António Torres Marques



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2014

Aos meus pais, irmão e avó

Resumo

Motivado pela importância da cortiça para o país e pelos recentes estudos nesta área, este trabalho procura estudar e explorar as potencialidades de cortiça aglomerada de atuar como material dedicado à absorção de energia de impacto, no âmbito da segurança passiva em capacetes rodoviários.

O poliestireno expandido (EPS) é um material utilizado em várias aplicações de absorção de energia, devido ao seu excelente desempenho, sustentado por baixa densidade e viabilidade económica. No entanto, este não apresenta retorno elástico e, uma vez deformado, a sua capacidade de absorção de energia fica comprometida. A cortiça, pela sua boa capacidade de absorção de energia e natureza viscoelástica, tem sido apontado por diversos autores como uma possível solução. Contudo, o grande obstáculo é contornar a sua excessiva densidade comparativamente ao EPS.

Numa primeira fase, a possibilidade de expansão da cortiça, por exposição a radiação micro-ondas, a fim de baixar a sua densidade, é avaliada experimentalmente. Porém, os resultados mostram que a expansão volumétrica não foi alcançada, o que representa uma motivação adicional para investigações adicionais nesta área que pode abrir portas a novas aplicações da cortiça.

De seguida, é desenvolvido um processo de moldação para criar núcleos de cortiça aglomerada com diferentes constituintes, assim como um composto de cortiça e EPS. O produto final resultou em núcleos cujas densidades variam entre 135-270 kg/m³, o que representa uma redução significativa ($\approx 50\%$) relativamente à densidade da cortiça utilizada nas simulações referidas.

Por fim, o comportamento dos núcleos é testado experimentalmente em ensaios de impacto de baixa velocidade. Foram definidas três gamas de energia: 5J, 20J e 40J. Os resultados, apesar de serem inconclusivos relativamente à problemática do multi-impacto, mostram que os núcleos de cortiça aglomerada de baixa densidade suportam os impactos referidos anteriormente, sendo outros pontos acrescentados à caracterização deste material tão próximo e, ao mesmo tempo, tão desconhecido.

Abstract

Motivated by the importance of cork for the country and based on recent studies in this area, this dissertation seeks to explore the potential of agglomerated cork to act as a material related to absorbing impact energy in the context of passive safety in road helmets.

Expanded polystyrene is a widely used material, with excellent energy absorption properties, thanks to its excellent performance, supported by low density and low production cost. However its capacity for energy dissipation after the first impact is significantly decreased, due to the almost total absence of elastic springback. On the other hand, cork is a material characterized by having both a good energy absorption capability and springback behavior, which means that its capacity to absorb energy is almost unchanged after the first impact. Nevertheless cork is typically heavier than the EPS currently used in the interior of the helmet which makes it less evident for this application.

In order to overcome this limitation, a process of volumetric expansion of cork, by exposure to microwave radiation, is evaluated experimentally. However, the results show that volumetric expansion is not achieved, which represents an additional motivation for further research in this area.

Then, a molding process is suggested in order to produce specimens made of agglomerated cork and a mixture of cork and EPS. The specimens created have resulted in cores with densities between 135-270 kg/m³, representing a significant decrease ($\approx 50\%$) when compared to the density of micro-agglomerated cork studied in simulations mentioned above.

Finally, to evaluate the performance of the proposed low-density cork for impact absorption applications, low velocity impact testing is performed for three stages of energy: 5J, 20J and 40J. Although multi-impact performance of cork is not discussed, the results suggest that agglomerated cork-based cores are able to absorb the previously mentioned impacts. Other points of interest are introduced into discussion, allowing a better understanding of this material.

Agradecimentos

Várias foram as pessoas que, de uma maneira ou outra, me apoiaram e deram a força necessária para terminar esta longa caminhada. Como tal, esta dissertação também vos pertence e, por isso, agradeço:

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Torres Marques e Prof. Dr. Nuno Correia, por terem aprovado a realização deste trabalho e por, apesar das exigências das suas funções, sempre se mostraram disponíveis para me acompanhar.

Ao LET, em especial ao Prof. Miguel Figueiredo, por me terem dado todas as condições e apoio necessário para a execução dos ensaios práticos.

Ao meu pai e à minha mãe, não só pelos seus conhecimentos, educação, compreensão e verdadeiro amor, mas também por tudo aquilo que me proporcionaram até hoje. A eles, tudo lhes devo.

Ao Ricardo porque... apesar de tudo, ele sabe o que significa para mim.

À minha avó por ser uma mãe mais velha.

À minha querida Catarina por, apesar da distância, me dar força e estar sempre ao meu lado.

Às minhas tias Paula e Céu pela preocupação e disponibilidade demonstrada.

Ao Eng. Albertino, por todas as “pequenas aulas” e pela constante disponibilidade demonstrada.

À Joana por me ter acompanhado no meu percurso académico e, sobretudo, por me conhecer melhor do que eu me conheço a mim próprio.

Ao Decas por não me deixar trabalhar sozinho no Submarino Amarelo.

Aos amigos do SPOT por me terem ouvido falar da tese, mais do que ninguém.

Aos restantes familiares e amigos pela compreensão e paciência demonstrados durante a realização da dissertação.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento da dissertação, o meu muito obrigado.

ÍNDICE

RESUMO	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMENTOS	4
ÍNDICE	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – ENQUADRAMENTO	3
2.1 – CAPACETE: ELEMENTO DE PROTECÇÃO	3
2.2 – CAPACETE DE MOTOCICLO	4
2.2.1 – Origem	4
3.2.2 – Estrutura do capacete	4
2.3 – NORMAS DE TESTE EM CAPACETES RODOVIÁRIOS	8
2.3.1 – BREVE REFERÊNCIA HISTÓRICA	8
2.3.2 – ENSAIOS TÉCNICOS	9
2.3.3 – COMPARAÇÃO ENTRE NORMAS	14
2.4 – BIOMECÂNICA DAS LESÕES CRÂNIO-ENCEFÁLICAS	15
2.4.1 – INTRODUÇÃO ANATÓMICA	15
2.4.2 – TRAUMATISMOS CRÂNIO-ENCEFÁLICOS E LESÃO CEREBRAL	19
2.4.3 – CRITÉRIOS DE LESÃO	24
3 – CORTIÇA	28
3.1 – ORIGEM E SUSTENTABILIDADE	28
3.2 – A IMPORTÂNCIA DA CORTIÇA: PRODUÇÃO, TRANSFORMAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO	30
3.3 – ESTRUTURA CELULAR DA CORTIÇA	32
3.4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CORTIÇA	34
3.4.1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO TECIDO SUBEROSO	36
3.5 – LIMITAÇÕES DA CORTIÇA	37
3.6 – ESTUDOS FEITOS SOBRE A CORTIÇA	39

3.7 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DA CORTIÇA	41
3.8 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS	50
4 - METODOLOGIA	53
4.1– INTRODUÇÃO	53
4.2 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS	54
4.2.1 – CARACTERIZAÇÃO DO GRANULADO	54
4.2.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE EXPANSÃO	58
4.3 – PRODUÇÃO DOS PROVETES	62
4.3.1 – NORMAS	62
4.3.2 – PROCESSO DE FABRICO	63
4.3.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES	66
4.4 – ENSAIOS DE IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE	68
4.4.1 – CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS ENSAIOS	68
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS	70
5.2 – PRODUÇÃO DOS PROVETES	75
5.3 – ENSAIOS DE IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE	76
5.3.1 – ENSAIO 5J	76
5.3.2 – ENSAIO 25J	81
5.3.3 – ENSAIO 40J	87
5.3.4 – CLASSE A, B e M	93
6 – CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHO FUTURO	96
REFERÊNCIAS	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacete Coríntio datado do século IV a.C. [3]	3
Figura 2 - BELL 500-TX.....	4
Figura 3 - Estrutura de um capacete de motociclismo [5]	5
Figura 4 - Curva tensão - deformação para espuma de EPS (56kg/m ³), para impactos com diferentes velocidades [9]	6
Figura 5 - Tipos de plataformas utilizadas pelas normas de capacetes rodoviários	11
Figura 6 - Ossos do crânio e da face humana [19]	16
Figura 7 - Sistema nervoso central [20]	16
Figura 8 - Meninges[21].....	17
Figura 9 - Lobos cerebrais e corpo caloso	18
Figura 10 - Lesões que podem advir de um TCE [25]	21
Figura 11 - Golpe e contragolpe [26]	22
Figura 12 - Wayne State Tolerance Curve [27].....	24
Figura 13 - Descortiçamento do sobreiro [37].....	28
Figura 14 - Desenho de Robert Hooke da estrutura celular da cortiça [42]	32
Figura 15 - Observações com microscópio eletrônico de varrimento da estrutura celular da cortiça: direção radial e tangencial [43]	33
Figura 16 - Forma e dimensões médias de uma célula de cortiça. As direções OX, OY e OZ representam a direção radial, tangencial e axial, respetivamente [39]	33
Figura 17 - Aspeto de cortiças com diferentes porosidades [49]	37
Figura 18 - Curva de compressão da cortiça: (a) curvas experimentais em compressão radial (R) e em compressão não-radial (NR) e (b) representação esquemática, evidenciando as três regiões da curva [43]	41
Figura 19 - Curvas experimentais do efeito de Poisson na cortiça [43]	43
Figura 20 - Efeito da velocidade de compressão ($\dot{\epsilon}$) nas curvas de compressão da cortiça: (a) compressão radial; (b) compressão não-radial [43].....	44
Figura 21 - Deformação das paredes celulares por encurvadura segundo as regiões da curva de compressão [52].....	47
Figura 22 - Efeito do gás no interior das células na resistência da cortiça [43]	48
Figura 23 - Recuperação viscoelástica da cortiça sob compressão [67].....	48
Figura 24 - Curva experimental de ϵ_r após compressão $\epsilon = 80\%$ a duas velocidades $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹): (--) $2,1 \times 10^{-4}$ e (...) $2,1 \times 10^{-2}$ [43]	49

Figura 25 - Crivo utilizado para a análise granulométrica	54
Figura 26 - Distribuição granulométrica para granulado de 0,5 a 2mm.....	55
Figura 27 - Distribuição granulométrica para granulado de 2 a 4mm.....	55
Figura 28 - Distribuição granulométrica para granulado de 4 a 7mm.....	55
Figura 29 - Recipiente cúbico normalizado.....	56
Figura 30 - Higrómetro e Aqua-boy	57
Figura 31 - Síntese do procedimento de ensaio	58
Figura 32 - Identificação do volume pré-expansão	60
Figura 33 - Representação esquemática do princípio de Arquimedes.....	61
Figura 34 - Proveta adaptada para aferir a expansão volumétrica dos grãos de cortiça.....	61
Figura 35 - Dimensões dos provetes	62
Figura 36 - Molde construído para produção dos provetes de cortiça aglomerada.....	64
Figura 37 - Esquema ilustrativo de uma razão de compactação volumétrica 3:1	64
Figura 38 - Prensa hidráulica manual utilizada	65
Figura 39 - Exemplo de classificação do provete A41	66
Figura 40 - Componentes da máquina Rosand IFW 5HV	68
Figura 41 - Granulado queimado.....	72
Figura 42 - Distribuição granulométrica para granulado de 0,5 a 2mm expandido e não-expandido	73
Figura 43 - Distribuição granulométrica para granulado de 2 a 4mm expandido e não-expandido	73
Figura 44 - Distribuição granulométrica para granulado de 4 a 7mm expandido e não-expandido	73
Figura 45 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.	76
Figura 46 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 5J.....	77
Figura 47 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.	78
Figura 48 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 5J	79
Figura 49 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.	79
Figura 50 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 5J	80

Figura 51 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.	81
Figura 52 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 25J	82
Figura 53 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.	83
Figura 54 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 25J	84
Figura 55 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.	85
Figura 56 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 25J	86
Figura 57 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.	87
Figura 58 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 40J	88
Figura 59 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.	89
Figura 60 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 40J	90
Figura 61 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.	91
Figura 62 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 40J	92
Figura 63 - Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M21 ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.	93
Figura 64 - Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M21 ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.	94
Figura 65 – Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M41 ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas para diferentes densidades de EPS [7]	6
Tabela 2 - Sumário das normas de capacetes [18].....	10
Tabela 3 - Características gerais de diferentes normas de capacetes rodoviários [18].....	11
Tabela 5 - AIS e correspondentes valores de HIC (para um intervalo de 15ms) [35].....	26
Tabela 6 - Área do montado do sobro em diversos países [40].....	30
Tabela 7 - Composição química da cortiça [46].....	34
Tabela 8 - Coeficientes de Poisson segundo as várias direções	43
Tabela 9 - Condições de serviço e expansão volumétrica verificada para amostras humidificadas por imersão em água [66]	51
Tabela 10 - Condições de serviço e expansão volumétrica verificada para amostras humidificadas em autoclave [66].....	52
Tabela 11 - Densidade média aparente para as diferentes granulometrias.....	56
Tabela 12 - Humidade média para as diferentes granulometrias	57
Tabela 13 - Condições do ensaio de impacto a baixa velocidade	69
Tabela 14 - Sumário das condições procedimentais do teste de expansão e resultados obtidos	71
Tabela 15 - Valores medidos experimentalmente segundo o princípio de Arquimedes para volumes.....	74
Tabela 16 - Características gerais dos provetes.....	75
Tabela 17 - Sumário do ensaio de 5J-A.....	76
Tabela 18 - Sumário do ensaio de 5J-B.....	78
Tabela 19 - Sumário do ensaio de 5J-M.....	80
Tabela 20 - Sumário do ensaio de 25J-A.....	81
Tabela 21 - Sumário do ensaio de 25J-B.....	83
Tabela 22 - Sumário do ensaio de 25J-M.....	85
Tabela 23 - Sumário do ensaio de 40J-A.....	87
Tabela 24 - Sumário do ensaio de 40J-B.....	89
Tabela 25 - Sumário do ensaio de 40J-M.....	91

1 – Introdução

Desde cedo, o Homem sentiu a necessidade de desenvolver dispositivos que aumentassem os seus níveis de segurança. Neste aspeto, muito antes dos mecanismos de lesão serem conhecidos, os capacetes surgiram como o meio mais efetivo de proteger a cabeça.

Atualmente, os capacetes rodoviários compreendem duas principais componentes de proteção: o casco exterior (geralmente fabricado em termoplástico/termoendurecível ou material compósito) e o *padding* protetor (EPS).

Vários estudos caracterizaram o comportamento do *padding* de proteção em EPS. Apesar de todas as grandes vantagens deste material, nomeadamente a capacidade de absorção de energia de impacto aliada a baixa densidade e custo produtivo, a principal limitação do EPS prende-se com o fato de este não apresentar retorno elástico e, sendo deformado, a sua capacidade de absorção de energia é comprometida.

Gonçalves et. al [1] e Coelho et. al [2] recentemente apontaram a cortiça como um possível material de interesse para aplicação em sistemas de proteção passiva. Recorrendo a simulações numéricas, os autores sublinharam certas vantagens da cortiça como a importância das suas propriedades viscoelásticas e capacidade de absorção de energia. Contudo, para aplicações como um capacete de motociclo que requeiram baixo peso, a grande limitação deste material celular natural é a sua excessiva densidade comparativamente ao EPS.

Este trabalho surge, deste modo, no seguimento dos referidos estudos numéricos realizados. Os principais objetivos da dissertação consistem em avaliar experimentalmente alternativas que permitam a diminuição da densidade da cortiça, assim como caracterizar o comportamento de núcleos aglomerados de cortiça submetidos ao ensaio de impacto de baixa velocidade.

A dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos:

1. Introdução e Objetivos

O primeiro capítulo apresenta os objetivos e motivação que está na base da dissertação, assim como o guia de leitura.

2. Enquadramento

O Enquadramento engloba as temáticas de interesse da dissertação, sendo dado um especial ênfase nos capacetes de motociclismo, normas de teste associadas e biomecânica das lesões da cabeça humana.

3. Cortiça

A Cortiça, como assunto central da dissertação, tem uma posição de destaque. Neste capítulo é feita uma recolha bibliográfica criteriosa acerca da caracterização da cortiça como material celular natural, assim como um levantamento de estudos relacionados com esta investigação.

4. Trabalho Experimental

O Trabalho Experimental engloba a caracterização da metodologia da expansão da cortiça, método de produção dos provetes e ensaios de impacto a baixa velocidade realizados.

5. Resultados e Discussão

Os resultados de interesse do trabalho experimental realizado são apresentados e discutidos nesta secção.

6. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

No capítulo final, as conclusões gerais do estudo realizado são enumeradas e são, também, sugeridas algumas hipóteses de trabalhos futuros neste âmbito.

2 – ENQUADRAMENTO

2.1 – CAPACETE: ELEMENTO DE PROTECÇÃO

O registo do primeiro capacete a ser utilizado pertence aos soldados Assírios em 900 a. C., sendo feito de uma camada grossa de couro ou bronze de forma a proteger a cabeça da penetração de espadas, flechas ou outros objetos pontiagudos durante um combate.

Inicialmente, os capacetes eram fabricados em couro, bronze ou ferro. A Figura 1 mostra um capacete Coríntio com um peso de 1.5kg, aproximadamente. Mais tarde, devido à dificuldade em forjar estes materiais, os capacetes começaram a ser fabricados inteiramente em aço forjado.



Figura 1 - Capacete Coríntio datado do século IV a.C. [3]

O uso militar do capacete teve uma queda acentuada quando surgiram as primeiras armas de fogo, no final do século XVII. No entanto, a chegada da I Guerra Mundial, juntamente com a artilharia pesada, renovou a necessidade em utilizar capacetes protetores, que foram prontamente introduzidos nas divisões de infantaria. No século XX, o aço dos capacetes evoluiu oferecendo, nesta altura, proteção contra estilhaços e balas.

Hoje em dia, os serviços militares utilizam capacetes fabricados em Kevlar®, um material compósito que apresenta excelentes propriedades na proteção a balas e fragmentos. Contudo, o campo de aplicação dos capacetes não se limita à proteção balística, mas também a atividades recreativas e desportivas (e.g. corridas de cavalos, futebol americano, hóquei no gelo, escalada, desportos motorizados), atividades laborais de alto risco (e.g. construção civil, atividade mineira, polícia de intervenção) ou como proteção adicional em meios de transporte (e.g. capacetes de bicicleta ou motociclismo).

2.2 – CAPACETE DE MOTOCICLO

Por definição, o capacete de motociclo é um equipamento de segurança utilizado pelo motociclista com a finalidade de proteger a sua cabeça em situações de impacto, de forma a prevenir/reduzir os danos causados ou mesmo salvar a vida do condutor.

2.2.1 – Origem

Em 1935, Thomas Edward Lawrence (também conhecido por “Lawrence da Arábia”) foi, de forma indireta, o responsável por tornar o capacete um elemento de segurança tão conhecido e importante. Este oficial inglês, apaixonado por motociclos, sofreu um grave acidente de viação perto de sua casa quando, ao tentar desviar-se de dois jovens, perdeu o controlo da moto e despistou-se. Na queda, como não usava capacete (que não era obrigatório por lei), sofreu graves lesões na cabeça, falecendo poucos dias depois.

Revoltado com a perda, Hugh William Bell Cairns – o neurocirurgião que se encarregou de tentar salvar Lawrence – iniciou um detalhado estudo sobre as lesões na cabeça provocadas por acidentes de viação e, também, os benefícios do uso do capacete. Graças aos estudos realizados por Sir. Hugh Cairns, o uso de capacete de segurança passou a ser obrigatório, tanto para os militares como para os civis ingleses. A Figura 2 mostra um capacete de viação da marca Bell. [4]



Figura 2 - BELL 500-TX

3.2.2 – Estrutura do capacete

À medida que os motociclos se tornaram mais rápidos e potentes, também o número de fatalidades aumentou, o que levou à necessidade de melhorar a segurança dos capacetes rodoviários. A grande evolução nesta indústria deu-se no período após a II Guerra Mundial quando o casco exterior, até então em couro, começou a ser fabricado num material polimérico mais resistente e o *padding* de absorção de energia foi introduzido. Desde então, novos componentes foram adicionados ao capacete de forma a melhorar a os índices de proteção ou o conforto do condutor, por exemplo. No entanto, a estrutura principal do capacete mantém inalterável – geralmente, esta engloba um casco exterior, um *padding* de

proteção e de conforto, um visor, um sistema de ventilação e de retenção, como é possível observar na Figura 3.

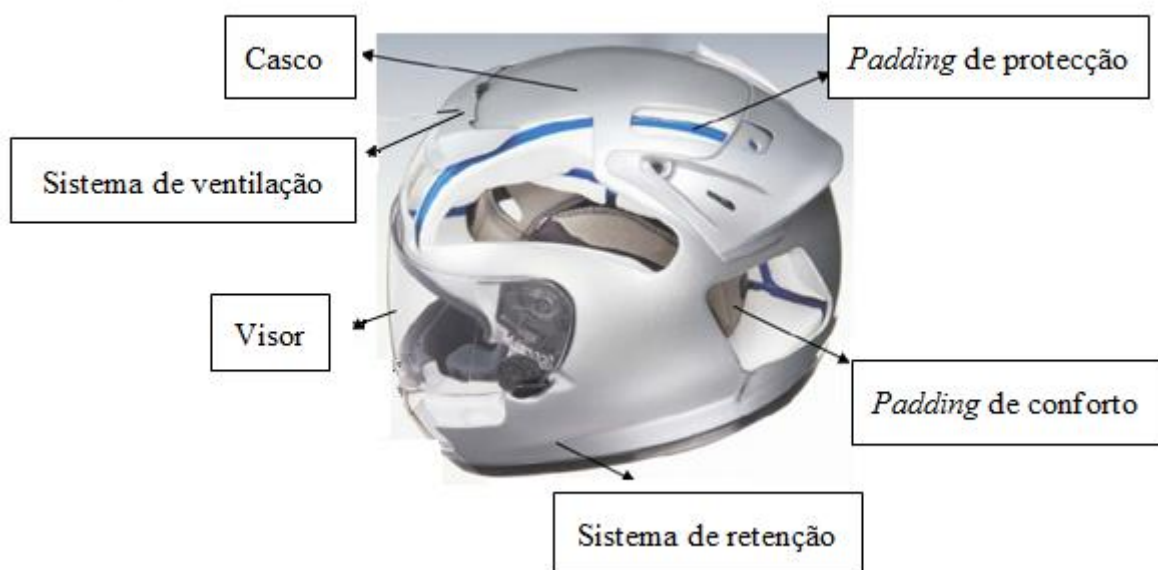


Figura 3 - Estrutura de um capacete de motociclismo [5]

Casco

O casco exterior de um capacete de motos tem três funções principais: (i) distribuir a força de impacto pelo máximo de área do capacete possível; (ii) prevenir a penetração de objetos; (iii) proteger o *padding* de proteção de efeitos abrasivos e desgaste associado ao uso diário.

Para o fabrico deste componente são, geralmente, usados três tipos de materiais: Policarbonato (PC), Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS) ou polímero termoendurecível/termoplástico reforçado com fibras (fibra de vidro, Kevlar® ou fibra de carbono).

O casco, apesar de ser um componente rígido, é ao mesmo tempo projetado para se deformar à compressão. Por um lado, este comportamento permite que a energia de impacto seja dispersada (entre 10-30% da energia de impacto) antes de alcançar a cabeça do condutor, aumentando os índices de segurança. [6]

***Padding* de proteção**

O *padding* de segurança situa-se entre o casco exterior e o *padding* de conforto. A grande maioria dos capacetes apresenta um *padding* protetor feito em Poliestireno Expandido (EPS), devido à sua boa capacidade de absorção/transmissão de energia, baixo peso e baixo custo de produção em grande escala. [7]

A absorção da energia resultante do impacto é conseguida através de um processo de esmagamento (e consequente destruição) da camada de EPS. A capacidade de absorção da energia do impacto é função da espessura da espuma e da densidade do material.

A espessura deste componente é limitada pelos requisitos mínimos das diferentes normas e, também, por aspetos relativos ao *design* do capacete. Contudo, a espessura média dos *padding*s encontrados no mercado varia, geralmente, entre 25 e 40 mm. Por sua vez, a densidade da espuma de EPS, para aplicação em capacetes de segurança rodoviária, varia entre 30 e 90 kg/m³ [8]. Recentemente, alguns fabricantes passaram a produzir um *padding* com diferentes densidades de modo a promover uma proteção adicional. A justificação para esta opção é baseada em estudos que evidenciam que a resistência do crânio humano é variável dependendo da zona da cabeça.

As propriedades mecânicas do EPS dependem, sobretudo, da sua densidade. Por norma, quanto mais elevada for a densidade da espuma, maior resistência à compressão apresenta. A Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas para diferentes densidades de EPS apresenta algumas propriedades mecânicas para diferentes densidades de espumas em EPS. O comportamento da espuma de EPS quando solicitado à compressão é apresentado na Figura 4.

Tabela 1 - Principais propriedades mecânicas para diferentes densidades de EPS [7]

Espumas de EPS			
Peso específico (kg/m ³)	35	50	70
Módulo de Elasticidade (MPa)	15	25	39
Resistência à compressão para deformação relativa de 2% (MPa)	0,224	0,328	0,51
Resistência à compressão para deformação relativa de 10% (MPa)	0,224	0,344	0,54

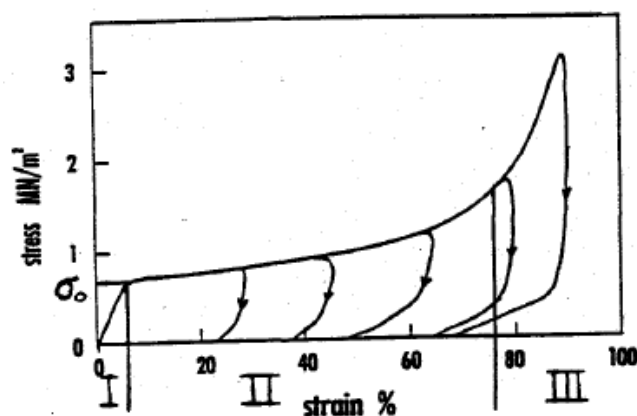


Figura 4 - Curva tensão - deformação para espuma de EPS (56kg/m³), para impactos com diferentes velocidades [9]

A curva encontra-se dividida em três áreas distintas: [8]

I – A primeira parte mostra um comportamento elástico do material, até que a tensão limite elástico (σ_0) seja alcançada. Quando as cargas de compressão são superiores a este ponto de transição, o regime plástico é alcançado e a espuma não recupera a sua forma inicial.

II – A segunda zona caracteriza-se pelo início do «esmagamento» da espuma. É visível no gráfico um patamar praticamente constante, que vai desde 5-75% da deformação. Nesta zona, as células de EPS começam a colapsar e é nesta secção que se dá a grande absorção/dissipação de energia (representada pela área inferior à curva).

III – Na parte final regista-se uma nova transição no comportamento do material, em que a tensão aumenta significativamente devido ao «*bottoming out*» crítico das células. O EPS é um material celular e, portanto, contém gás no interior das suas células. Ao ser comprimido, o gás que outrora existia dentro da espuma começa a ser libertado, sendo que no limite o material começa a comportar-se como um sólido homogéneo.

No entanto, a capacidade de absorção de choque de um capacete não depende apenas do *padding* de proteção. É também função dos materiais escolhidos para o conjunto do casco e do forro protetor. Assim sendo, um casco em material compósito, mais rígido, é geralmente combinado com espuma de EPS de baixa densidade. Por outro lado, os cascos de ABS ou (PC), menos rígidos, são combinados com espumas mais rígidas de EPS de alta densidade. [1]

***Padding* de conforto**

O objetivo do *padding* de conforto é, tal como o nome sugere, aumentar o conforto para o motociclista e promover um bom ajustamento do capacete à sua cabeça. Este consiste em espumas sintéticas de poliuretano (PU) ou de policloreto de vinilo (PVC), caracterizadas por serem espumas uniformes, de células abertas, de baixa densidade e flexíveis, revestidas por um têxtil. [10]

Apesar de este componente não ser tão relevante em termos de absorção de energia, a sua importância não pode ser desprezada. Além de ser responsável pelo conforto do utilizador, o que por si só é determinante, também tem um papel decisivo na absorção da humidade gerada no interior do capacete e na dispersão do calor acumulado.

Visor

O visor funciona como um escudo que protege o condutor do vento, poeiras, insetos e radiação ultravioleta. É estritamente necessário que seja feito num material transparente que garanta total visão ao condutor sem qualquer tipo de distorção ótica. [11]

O material de eleição para este componente é PC, sendo que certos fabricantes apontam para um mercado diferente e escolhem Lexan, um polímero à prova de bala.

Sistema de retenção

O sistema de retenção do queixo é usado para manter o capacete na posição correcta, antes e durante o impacto. Semelhante a um cinto de segurança do automóvel, deve ser de colocação e remoção fácil. [11]

Sistema de ventilação

Este componente é responsável por direccionar o vento, resultante da velocidade do motociclo, para o interior do capacete de forma a ventilar o ar quente e húmido para o exterior. [11]

2.3 – NORMAS DE TESTE EM CAPACETES RODOVIÁRIOS

Esta secção destina-se à exposição das várias normas de teste utilizadas em capacetes rodoviários, apresentando as suas semelhanças e diferenças. As normas referidas neste tópico dizem respeito às versões correntes da norma DOT, Snell e ECE que são as normas vigentes nos Estados Unidos, Canadá e Europa, respetivamente. Desde já, importa referir que estas apenas se referem a transportes rodoviários, não abrangendo atividades de lazer, segurança ou desportivas.

2.3.1 – BREVE REFERÊNCIA HISTÓRICA

A segurança e conforto dos capacetes rodoviários têm vindo a aumentar substancialmente desde a primeira patente registada em 1953 [12] e o primeiro capacete integral comercializado a partir de 1967. Na sua maioria, as normas são reelaboradas aproximadamente a cada 5 anos, quando o nível de desenvolvimento permite uma melhoria em termos de proteção da cabeça fruto do aparecimento de materiais com melhor absorção de energia ou o aprofundamento do nível de conhecimento sobre as lesões na cabeça. Desta forma, ao longo do tempo os fabricantes de capacetes rodoviários foram acompanhando o grau de exigência das normas vigentes, o que se traduziu na comercialização de capacetes cada vez mais seguros.

A *British Standard Institution* (BSI) foi a primeira instituição a lançar uma norma de testes de capacetes rodoviários, designada 1869:1952 [13]. Este teste baseava-se na aplicação de forças de choque a um modelo de cabeça protegido por um capacete. Em termos técnicos, o teste consistia na queda de um bloco de 4.5kg, de uma altura de 2.7m, sobre o modelo fixo, sendo as forças dinâmicas registadas por um indicador montado na estrutura. Assim sendo, os capacetes eram qualificados e aprovados para comercialização na Grã-Bretanha se a força registada não fosse superior a 22.2kN.

A norma Britânica foi extremamente importante por duas razões. Por um lado, foi uma ferramenta de avaliação da segurança dos capacetes existentes sendo que, por outro, serviu como orientação para a conceção para a elaboração das normas seguintes. No início dos anos 60, a *Snell Memorial Foundation* (SMF) começou por administrar um programa de certificação muito semelhante ao programa da BSI. No entanto, os níveis mínimos de desempenho dos capacetes foram elevados, possibilitando apenas certificar os melhores capacetes no mercado. À medida que os capacetes conseguiam a aprovação no teste, os requisitos mínimos eram consequentemente aumentados. De referir que, ao contrário da norma BSI, não era obrigatório que o capacete fosse aprovado pela SMF para a sua

comercialização. No entanto, como seria de esperar, todos os fabricantes pretendiam o certificado de segurança porque os modelos certificados eram mais facilmente vendidos.

Em 1966, a *American Standards Association* (ASA) que, mais tarde, deu origem à *American National Standards Institute* (ANSI), publicou a primeira norma para capacetes de proteção, Z90.1-1966 [14], pela qual todos os capacetes vendidos nos Estados Unidos tinham que se reger. Inspirado nesta, surge a atual norma Federal de Segurança Automóvel 218 [15], que se tornou efetiva e obrigatória em 1973 pelo U. S. *Department of Transports* (DOT). Ambas as normas não administram nenhum programa de certificação correspondente, pelo que o cumprimento da DOT serve para evitar eventuais conflitos legais que surjam. Em caso de acidente, os fabricantes que optem por não testar os seus capacetes podem ser responsabilizados pelas lesões sofridas.

Na Europa, a primeira norma, designada por ISO R 1511 [16], surgiu em 1970, tornando-se imediatamente efetiva. As Nações Unidas recomendaram o Regulamento ECE 22 [17] aos diversos governos com o objetivo de uniformizar os produtos europeus de forma a promover o comércio internacional. A administração do certificado de qualidade “CE” é feita por agências competentes distribuídas por toda a Europa. Tal como as normas Snell e DOT, o Regulamento ECE 22 foi fortemente influenciado pela norma BSI.

2.3.2 – ENSAIOS TÉCNICOS

Cada norma especifica vários testes consoante as diferentes categorias do desempenho do capacete. Tendo em conta que certas especificações variam consoante a respetiva norma, o sumário dos testes mais relevantes serão apresentados de seguida [1].

- **Testes de choque:** envolvem um impacto onde o modelo da cabeça é colocado dentro do capacete rodoviário, sendo o conjunto deixado cair sobre uma plataforma. Através da medição das forças de impacto resultantes, obtém-se a aceleração média no centro de massa do modelo que está relacionada com a capacidade do capacete em reduzir o risco de lesão na cabeça ou cérebro;
- **Testes de resistência à penetração:** avaliam a resistência do capacete ao impacto causado por uma força localizada de forma a averiguar se existe, de facto, possibilidade de penetração do capacete e do modelo da cabeça;
- **Testes de rigidez:** conferem a competência do capacete em suportar forças de compressão quase-estáticas;
- **Testes de fricção:** estes testes podem ser divididos em duas categorias, incorporando os testes de forças criadas por abrasão e os testes em que as forças são causadas por

contacto com saliências. Em ambos os testes, o conjunto é sujeito a movimentos rotacionais reduzidos;

- **Testes ao sistema de retenção:** a estabilidade posicional do capacete é testada através da aplicação de forças externas para averiguar se o capacete se mantém fixado durante uma simulação de um acidente, sendo a facilidade de colocação/extração do sistema também verificada.
- **Testes ao visor:** a segurança das viseiras também é testada, tanto ao nível de impacto de projéteis de dimensões reduzidas, como ao nível da qualidade ótica do material e da visão periférica.

A Tabela 2 - Sumário das normas de capacetes trata-se de uma compilação dos requisitos gerais de cada teste para as normas previamente anunciadas. As normas ECE e DOT são discutidas por serem legalmente aprovadas na Europa e nos Estados Unidos, respetivamente. Por outro lado, a norma Snell é também um ponto de interesse por ser uma norma credível devido aos requisitos rigorosos que apresenta.

Tabela 2 - Sumário das normas de capacetes [18]

Norma	Choque	Penetração	Retenção	Visor	Rigidez	Fricção
ECE-R.22	+	+	+	+	+	+
Snell M2000	+	+	+	+		
DOT FMVSS 218	+	+	+	+		

Testes de absorção de choque

A capacidade do capacete resistir ao impacto é a principal preocupação da maioria das normas e, consequentemente, dos fabricantes. No entanto, a qualidade do capacete não é obrigatoriamente avaliada consoante a quantidade total de energia absorvida no impacto. Mais importante do que este aspeto, a aceleração g resultante na cabeça deve ser medida durante o tempo de impacto e, a partir deste resultado, são determinados os critérios de lesão, tais como a máxima aceleração da cabeça e o *Head Injury Criteria* (HIC), que serão abordados com maior detalhe na secção 2.4.3.

O rigor deste teste, relativamente ao critério usado, assim como a forma da plataforma de impacto onde esta ocorre, varia de norma para norma. A Tabela 3 - Características gerais de diferentes normas de capacetes rodoviários compila os requisitos gerais das normas Snell, DOT e ECE.

Tabela 3 - Características gerais de diferentes normas de capacetes rodoviários [18]

Norma	Forma da Plataforma	Impacto		Critério
		1º Impacto	2º Impacto	
ECE-R.22	plana ou cutelo	7,5 [m/s]	-	$a_{r,max} < 275 \text{ g}$ $HIC < 2400$
Snell M 2000	plana	150 [J]	110 [J]	$a_{max} < 300 \text{ g}$
	hemisférica	150 [J]	110 [J]	
	berma	150 [J]	-	
DOT FMVSS 218	plana	6,0 [m/s]	6,0 [m/s]	$a_{max} < 400 \text{ g}$
	hemisférica	5,2 [m/s]	5,2 [m/s]	$a_{2ms} < 200 \text{ g}$
				$a_{4ms} < 150 \text{ g}$

Existem quatro bigornas diferentes (Figura 5): a plana, que é usada em todas as normas; a hemisférica, com um diâmetro aproximadamente de 0.1m, usada na M2000 e DOT; em cutelo, que se assemelha ao pavimento da estrada, usada na R. 22; e a plataforma com berma usada na M2000, que é composta por um feixe de 6mm de largura.

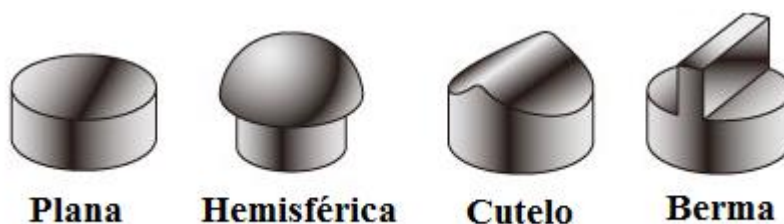


Figura 5 - Tipos de plataformas utilizadas pelas normas de capacetes rodoviários

A razão da utilização de diferentes plataformas consiste em testar o capacete simulando situações reais de impacto na estrada. A zona de contacto altera consoante a bigorna utilizada: a plana resulta numa área circular de contacto; a hemisférica contacta o capacete apenas num ponto; a forma de contacto em cutelo é, também uma linha; e, no caso da berma, o impacto dá-se simultaneamente em vários pontos do capacete.

A norma ECE requer apenas um impacto contra bigornas planas e em cutelo, com uma velocidade de impacto 7.5m/s para ambos os tipos de bigornas. Esta norma contempla ainda diferentes tamanhos de cabeça normalizados (designados pelas letras A, C, E, G, J, K, M e O) a que estão associadas diferentes energias de impacto. Para os tamanhos E, J e M, que são equiparados aos tamanhos pequeno, médio e grande, dos modelos da cabeça usados na DOT, a energia é respetivamente, 115, 132 e 158 J.

No caso da norma Snell M2000, esta exige pelo menos cinco impactos num capacete de forma aleatória: dois impactos numa plataforma plana; dois impactos numa plataforma hemisférica, num ponto distanciados no mínimo de 120 mm do ponto de impacto anterior; e um impacto numa plataforma com berma, também num ponto distanciados de 120mm dos

pontos anteriores. A primeira queda é sempre efetuada a uma velocidade de impacto de 7.7 m/s (equivalente a 150 J), enquanto a segunda queda, no caso de ser requerida, é executada a uma velocidade de 6.6 m/s (equivalente a 110 J). Nesta norma, não há diferenciação para os diversos tamanhos de cabeça, pelo que a massa da cabeça e do sistema de guiamento são sempre os mesmos. Por fim, apenas acrescentar que o procedimento de impacto deixa uma margem considerável a quem está a testar o capacete relativamente ao ponto de impacto e à ordem de seleção das plataformas.

A norma DOT, tal como a M2000, também requer dois impactos em cada ponto, testados apenas contra bigornas planas e hemisféricas. Em ambos os casos são selecionados dois pontos diferentes, recebendo cada ponto dois impactos, o que faz com que cada capacete receba oito impactos no total. Os pontos de impacto devem estar separados a uma distância mínima igual a 1/6 da circunferência da cabeça. A velocidade requerida depende do tipo de plataforma, não variando do primeiro para o segundo impacto. Tal como a norma ECE, o tamanho do capacete determina a cabeça modelo a usar e, consequentemente, a energia cinética da cabeça e sistema de guiamento antes do impacto. Os valores da energia cinética antes do impacto são, respetivamente para cabeças pequenas, médias e grandes, 63, 90 e 110 J para impactos em plataformas planas, e 47, 68 e 82 J para plataformas hemisféricas.

A grande diferença entre a norma ECE e as restantes prende-se na forma como a cabeça é suportada durante o teste de queda. Na norma europeia, o sistema de guiamento não é fixo à cabeça e capacete o que permite movimento em todos os 6 graus de liberdade durante o impacto. Neste caso, o movimento rotacional da cabeça é considerado, sendo no caso da DOT e Snell eliminado devido à fixação do sistema de guiamento à cabeça e capacete. Contudo, a norma ECE não mede a aceleração rotacional da cabeça.

As condições de teste são relativamente similares para todas as três normas. Antes da execução do teste, o capacete é condicionado com uma mistura solvente, de forma a simular o desgaste da corrente utilização do capacete. Depois, um condicionamento extra é aplicado ao capacete de forma a simular as condições atmosféricas (ambiente, calor, frio e piso molhado). A norma ECE requer que o capacete seja testado com todos os 4 tipos de condições sendo que, por outro lado, a norma DOT e Snell deixam à escolha do técnico o único tipo de condição a utilizar.

Testes de resistência à penetração

A penetração é uma causa pouco frequente de lesão. Por esta razão, a norma ECE deixou de exigir o teste de penetração, sendo que este tipo de teste é semelhante para as normas DOT e Snell. No entanto, no caso do teste de resistência à penetração ser excluído das referidas normas, um perigoso precedente pode ser aberto, o que pode resultar em mais casos de lesões graves resultantes da penetração.

O teste técnico em si comporta a fixação do modelo da cabeça ao chão e a queda de um punção cónico sobre a cabeça e capacete. O punção de 3kg é libertado a uma altura de 3m, o

que equivale a uma energia de impacto de 88.3 J. Se o punção tocar no modelo da cabeça durante o impacto, o capacete é reprovado no teste.

Teste ao sistema de retenção

Este teste estende-se à totalidade das normas. A norma DOT aplica uma força externa estática à cabeça de 1.11 kN. Por outro lado, as restantes normas aplicam cargas dinâmicas usando uma massa largada a uma determinada altura (ECE: 10kg/0.75m; Snell: 6kg/0.6m). O sistema de retenção deverá suportar estas cargas sem que o seu comprimento se estenda em mais de 30 mm.

As normas ECE e Snell requerem, igualmente, um teste de estabilidade posicional do capacete. Este teste, designado por *roll-off*, em que um equipamento tenta retirar o capacete da cabeça, sem abrir o sistema de retenção.

Estas normas incluem, ainda, um teste adicional para a amovibilidade. O técnico deverá ser capaz de remover um capacete devidamente ajustado à cabeça em menos de 30s, usando apenas as mãos.

A norma ECE inclui outros testes, como por exemplo, resistência à abrasão ou durabilidade do sistema de retenção. Por esta razão, pode-se afirmar que o sistema de retenção é testado mais rigorosamente por esta norma.

Testes ao visor

Os testes a este componente do capacete podem ser divididos em três diferentes ensaios: teste à visão periférica, teste à transmissão de luz e teste à resistência à penetração. Contudo, apenas a norma ECE requer os três testes pelo que, neste tipo de teste, é também a norma mais exigente.

O procedimento de teste para a visão periférica é praticamente o mesmo para as normas abordadas, sendo que o requisito mínimo é que o campo de visão seja pelo menos de 210°. A resistência à penetração do visor é requerida pelas normas Snell e ECE. O procedimento de teste, para a norma ECE, é semelhante ao teste de resistência à penetração do capacete, discutido anteriormente. No caso da Snell, um projétil de 1g é projetado contra o visor a 500km/h. O capacete é rejeitado quando o projétil estilhaça a viseira ou penetra para o interior do mesmo. Finalmente, a transmissão da luz do visor é apenas testado pela norma ECE. Se essa transmissão for inferior a 80%, o capacete destina-se apenas à utilização diurna, sendo que o visor é rejeitado quando esta é inferior a 50%. Adicionalmente, como medida para simular o desgaste e uso inadequado do capacete, o visor é submetido a um tratamento abrasivo – no caso de a transmissão de luz ser inferior a 20%, o capacete é rejeitado.

Testes de fricção

Apenas incluído na norma ECE, é um teste conjunto para projeção e fricção, baseado na norma BS 6658. Neste, é realizado um teste de queda, onde as forças rotacionais induzidas são causadas por projeções no capacete e por fricção contra uma superfície rugosa, assemelhando-se a um acidente onde o motociclista cai e desliza sobre o pavimento.

Testes de rigidez

A norma ECE sugere o teste de rigidez do capacete através da aplicação de cargas de compressão estáticas. O capacete deve ser colocado entre duas barras paralelas para que uma carga conhecida possa ser aplicada ao longo do eixo longitudinal e, de seguida, ao eixo transversal. O capacete deve ser substituído no final de cada ensaio.

Uma carga inicial de 30N é aplicada durante 2min, a uma velocidade mínima das placas de 20mm/min. Após este tempo, a distância entre placas deve ser medida, não devendo ser superior a 15mm. De seguida, a carga é aumentada de 100N durante dois minutos, à mesma velocidade das placas. Este procedimento é repetido até se obter uma carga aplicada de 630N, a distância entre placas é medida, não devendo ser superior a 40mm.

2.3.3 – COMPARAÇÃO ENTRE NORMAS

As normas de testes são resultado de várias experiências práticas realizadas, sendo normalmente aperfeiçoadas ao longo do tempo com a introdução de novos testes, de forma a acompanhar a evolução da ciência e da técnica. Na generalidade dos casos, com a exceção para o teste de absorção de energia, os capacetes raramente falham um teste.

Várias fontes consideram a norma Snell como a norma mais exigente. No entanto, este tipo de designações por vezes é mal empregue, uma vez que o rigor dos testes não se limita apenas aos requisitos mínimos, como também a diversidade dos testes ou os critérios aplicados. Por isso, a norma ECE, que é bastante semelhante à Snell, em determinados casos já se destaca, pois envolve testes adicionais ao capacete como os testes de rigidez ou de fricção, entre todos os outros anteriormente citados. Adicionalmente, a norma europeia é a única que requer uma avaliação do HIC, que é aceite pela grande maioria como sendo o melhor critério de lesão atualmente disponível (ver secção 2.4.3). Contudo, o HIC apenas atenta a aceleração translacional, sendo que nenhuma norma implementada considera um teste de avaliação da capacidade do capacete em minimizar lesões resultantes de acelerações rotacionais. Estes efeitos rotacionais deveriam, também, ser tomados em consideração numa nova norma pois, recentes investigações apontam que as acelerações rotacionais são a mais influente causa de lesões graves na cabeça. Na secção 2.4.3 vários critérios de lesão são discutidos e, de facto, o maior conhecimento do mecanismo de lesão crânio-encefálico leva a que as normas se adaptem e os capacetes se tornem cada vez mais seguros. Todavia, este processo – tal como a

demora na aceitação do HIC demonstra – é extremamente lento, pelo que é expectável que a validação destes novos critérios leve vários anos.

Apesar da norma ECE considerar uma maior diversidade de testes, o tronco comum dos ensaios mais importantes é bastante semelhante para todas as normas. Olhando para o teste de absorção de choque, que é provavelmente o aspeto mais importante na segurança do capacete, verifica-se que a norma ECE utiliza o valor mínimo mais exigente. No entanto, o teste é apenas realizado para o caso da plataforma plana ou em cutelo, contrastando com as normas Snell e DOT que consideram as restantes formas geométricas. Este é um ponto pertinente visto que, no dia-a-dia, acontecem acidentes rodoviários em que o condutor embate com o mais diverso tipo de obstáculos. Adicionalmente, não é difícil de imaginar uma situação de embate em que o motociclista embate contra um primeiro obstáculo sendo, de seguida, projetado e colidindo novamente contra um segundo obstáculo. Por esta razão, o facto das normas Snell e DOT considerarem o fator de impactos múltiplos é benéfico pois aproxima os testes de ensaio da realidade rodoviária, o que torna estas normas mais efetivas. Acrescentado que o EPS, devido ao seu comportamento colapsável, não é capaz de recuperar elasticamente as suas características originais após o primeiro impacto, esta problemática deve ser enaltecida e suscetível de futuras investigações.

2.4 – BIOMECÂNICA DAS LESÕES CRÂNIO-ENCEFÁLICAS

Neste capítulo pretende-se fazer uma breve abordagem da biomecânica das lesões crânio-encefálicas, assunto polémico e com alguns aspetos ainda por esclarecer na totalidade. De início descreve-se de forma sumária a anatomia da cabeça e os principais tipos de lesão crânio-encefálica associados a acidentes rodoviários. De seguida abordam-se os critérios de lesão, dando particular ênfase aos critérios Head Injury Criteria (HIC) e Critério de Aceleração Máxima.

2.4.1 – INTRODUÇÃO ANATÓMICA

A cabeça humana tem uma morfologia complexa tornando-se difícil descrevê-la numa forma simples. Segundo Moore, K, 1999, a cabeça consiste em crânio, face, escalpo ou couro cabeludo, dentes, encéfalo, nervos cranianos, meninges, órgãos dos sentidos especiais e outras estruturas, como vasos sanguíneos, linfáticos e gordura. [19] O crânio é o esqueleto da cabeça, e é constituído pelo neurocrânio e pelo esqueleto da face. O neurocrânio (ou caixa craniana, Figura 6) fornece um invólucro para o encéfalo e meninges encefálicas (membranas que recobrem o encéfalo), partes proximais dos nervos cranianos e vasos sanguíneos. Este possui um teto semelhante a uma abóbada – a calvária, calote craniana ou convexidade – e um soalho – a base do crânio. O neurocrânio dos adultos é formado por oito ossos. O esqueleto da face consiste em ossos que circundam a boca e o nariz e contribuem para as órbitas (cavidades orbitais) e é constituído por catorze ossos.

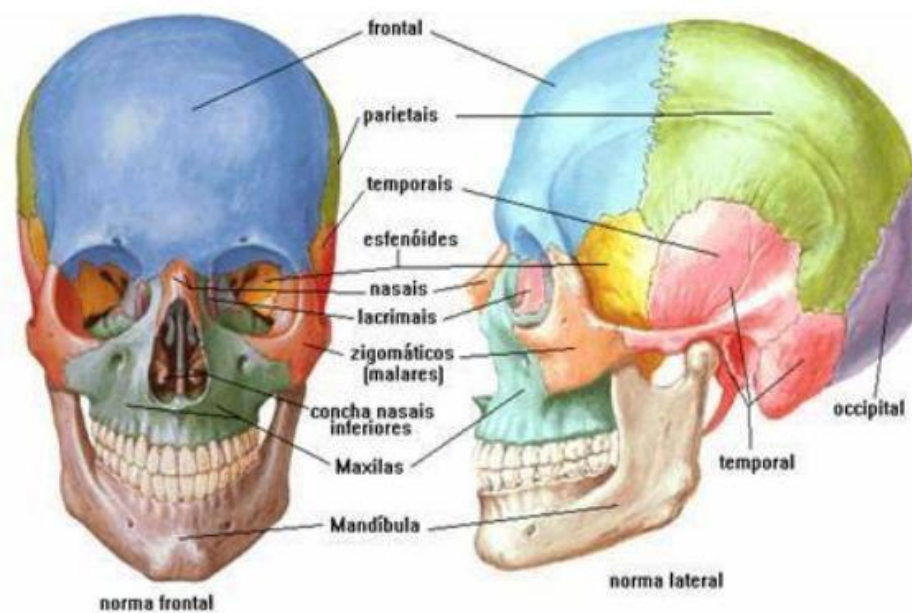


Figura 6 - Ossos do crânio e da face humana [19]

Em anatomia, chama-se sistema nervoso central (SNC), ou neuroeixo, ao conjunto do encéfalo e da medula espinhal (Figura 7).

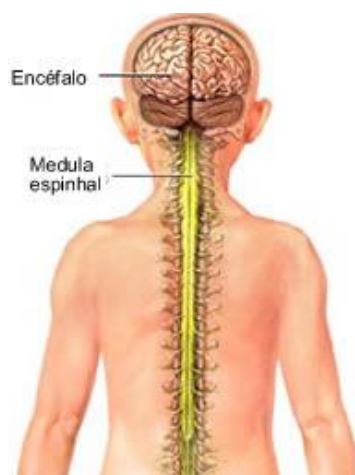


Figura 7 - Sistema nervoso central [20]

O SNC é envolvido por membranas conjuntivas denominadas meninges. As meninges são três, sendo de fora para dentro, a dura-máter, a aracnóide, e a pia-máter (Figura 8).

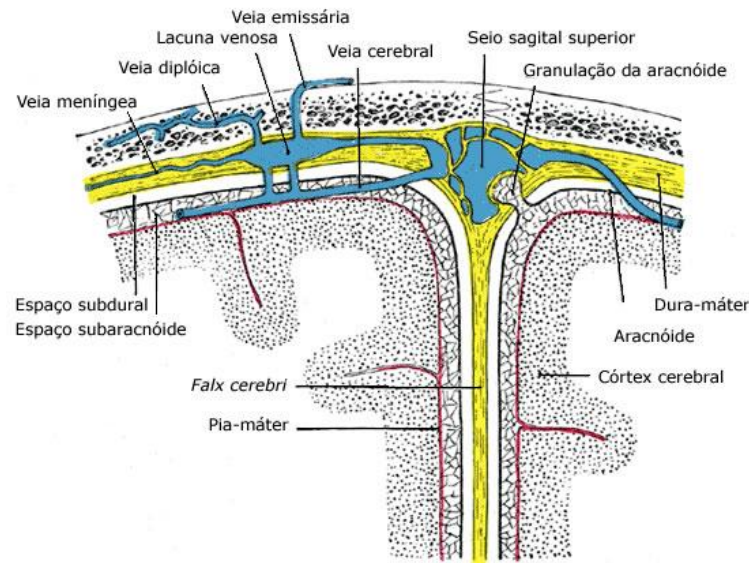


Figura 8 - Meninges[21]

O tronco encefálico possui estruturas nervosas responsáveis pelo controlo de funções tão importantes e vitais como a respiração, o ritmo cardíaco e a pressão arterial.

Cada um dos hemisférios cerebrais consiste numa camada externa de substância cinzenta, denominada córtex cerebral, uma massa interna de fibras brancas, a substância medular, na qual estão diversas grandes massas de substância cinzenta, os núcleos basais e, ainda, uma cavidade cheia de líquido (o líquido céfalo-raquidiano ou líquor), o ventrículo lateral. [22]

Cada hemisfério cerebral é, também, dividido em áreas denominadas lobos cerebrais, cada uma com funções diferenciadas e especializadas. Assim, temos, de cada lado, cinco lobos: frontal, temporal, parietal, occipital e lobo da ínsula (Figura 9).

Os dois hemisférios cerebrais estão unidos pelo corpo caloso. O corpo caloso (Figura 9) localiza-se no fundo da fissura inter-hemisférica, ou fissura sagital. É composto por fibras nervosas de cor branca (feixes de axónios envolvidos em mielina) e é a estrutura responsável pela conexão e troca de informações entre os dois hemisférios cerebral.

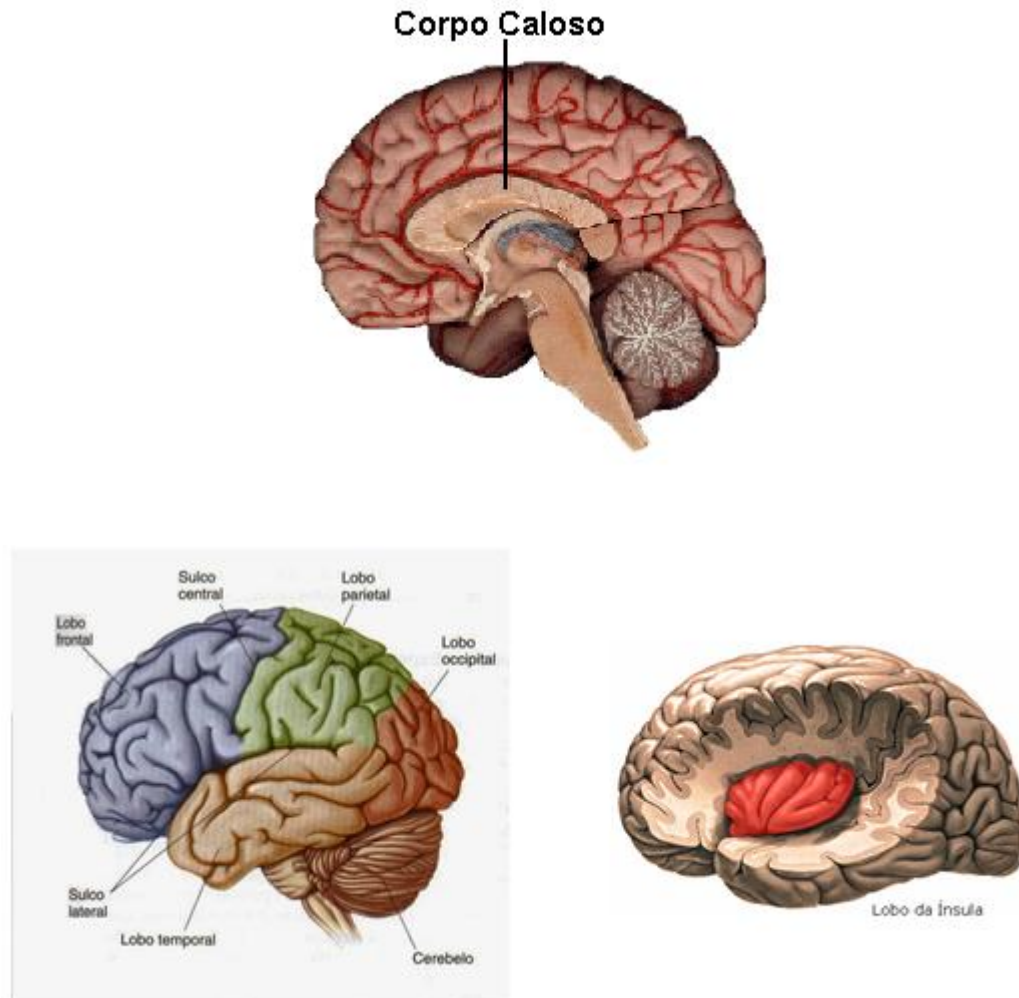


Figura 9 - Lobos cerebrais e corpo caloso

Lobos frontais

Nos lobos frontais, localizados na parte da frente do cérebro, acontece o planeamento de ações e do movimento, bem como o pensamento abstrato e criativo. [21]

Lobos temporais

Ficam na zona do cérebro localizada acima das orelhas e têm como função principal processar os estímulos auditivos. [21]

Lobos parietais

Na região superior do cérebro temos os lobos parietais, constituídos por duas subdivisões, uma anterior e outra posterior. A primeira, também chamada de córtex somatossensorial, tem a função de possibilitar a percepção de sensações como o tato, a dor e o calor. A zona posterior analisa, interpreta e integra as informações recebidas pela zona anterior, permitindo ao indivíduo localizar-se no espaço e reconhecer objetos através do tato. [21]

Lobos occipitais

Localizados na parte posterior do cérebro, os lobos occipitais processam os estímulos visuais, e, por isso, também são conhecidos por córtex visual. [21]

Lobos da ínsula

Fazem parte do sistema límbico e são responsáveis pela coordenação das emoções e pelo paladar. [21]

2.4.2 – TRAUMATISMOS CRÂNIO-ENCEFÁLICOS E LESÃO CEREBRAL

Hoje em dia, na nossa sociedade industrializada, os traumas crânio-encefálico e raquimedular são das maiores causas de morbidade e mortalidade em adolescentes e adultos jovens do sexo masculino, constituindo um problema major de saúde pública e social.

Em muitos acidentes, a cabeça é exposta a cargas superiores à resistência dos seus recursos naturais de proteção. Destes traumatismos resultam sequelas graves, habitualmente para o resto da vida, e, eventualmente, a morte. A reabilitação pode exigir anos de cuidados especializados, de alto custo.

Quedas e acidentes rodoviários são a principal causa (Kleiven et. al., 2003) dos traumatismos crânio-encefálicos. Define-se traumatismo crânio-encefálico (TCE) qualquer agressão que acarrete lesão anatômica ou comprometimento funcional do encéfalo e/ou as estruturas que o envolvem: couro cabeludo, crânio, meninges ou encéfalo. [23]

Os TCEs podem ser fechados (traumatismo sem perda da integridade do espaço intracraniano) ou abertos (traumatismo em que há comunicação entre os espaços intra e extracraniano, com rotura da dura-máter). Os traumatismos abertos associam-se mais frequentemente a persistência de fistula de líquor com infecção secundária (meningite e abscesso cerebral) ou epilepsia pós-traumática.

A mortalidade e morbidade após um TCE dependem não só da lesão primária provocada pelo impacto mecânico, mas também do aparecimento de lesão secundária produzida por alterações sistêmicas ou intracranianas relacionadas ou não com a lesão inicial. [24]

Lesão primária

A lesão cerebral primária, causada pelo impacto mecânico, pode subdividir-se em direta e indireta. As lesões primárias diretas (de contacto ou de impacto) associam-se normalmente a lesões do couro cabeludo e crânio. As lesões primárias indiretas (de contragolpe ou contra-impacto) são devidas ao movimento angular que cérebro adquire com o choque e podem ocorrer na ausência de lesões diretas detetáveis.

A lesão primária inclui: concussão cerebral, contusão hemorrágica e laceração cerebral com solução de continuidade da pia-máter, lesão vascular com rotura de vasos sanguíneos provocando hematomas (extradural, subural e intracerebral), hemorragia subaracnoideia e intraventricular e lesão axonal difusa (LAD), que se caracteriza por disfunção extensa dos hemisférios cerebrais, com consequente alteração do estado de consciência. [24]

Lesão secundária

A lesão secundária cerebral surge posteriormente ao acidente e pode ter causas extra ou intracranianas. O principal objetivo do tratamento médico do doente com TCE é prevenir e tratar a lesão secundária. Este tipo de lesão pode surgir não só nos traumatismos graves, mas também nos moderados e ligeiros (“patients that talked and died”).

Entre as causas intracranianas destacam-se os hematomas, o edema (“inchaço”) cerebral, a isquemia (por falta de irrigação sanguínea e consequente diminuição do aporte de oxigénio ao cérebro) regional ou global, a hidrocefalia (aumento do volume dos ventrículos cerebrais), a infeção e as convulsões. O cérebro é um órgão especialmente sensível a agressões isquémicas devido às suas limitações em armazenar substratos, tornando-o completamente dependente de um fluxo arterial contínuo e de um aporte de oxigénio e glicose constantes. Um edema e/ou hematoma a desenvolver-se necessita de espaço, pelo que comprime outras estruturas intracranianas, desencadeando efeito de massa e aumento da pressão intracraniana. Estas alterações condicionam o compromisso das estruturas (desvio da linha média e herniação), perda dos mecanismos de regulação do fluxo sanguíneo cerebral (auto-regulação e vasoreactividade) e da barreira hemato-encefálica, levando ao aparecimento de lesões secundárias.

Entre as causas extracranianas da lesão secundária destacam-se alterações hemodinâmicas (hipo e hipertensão), alterações respiratórias, anemia, alterações do equilíbrio ácido-base (acidose e alcalose), alterações iónicas, hiper e hipoglicemia, alterações da coagulação e hipertermia. [24]

Lesão terciária

A lesão terciária é resultado do desencadear de uma série de cascatas bioquímicas a nível dos neurónios cerebrais. Na realidade, após o impacto mecânico há uma série de células e

circuitos neuronais que apresentam alterações funcionais, que podem evoluir para a recuperação ou para a lesão estrutural irreversível. [24]

As lesões que podem advir dum TCE podem ser agrupadas da seguinte maneira (Figura 10):

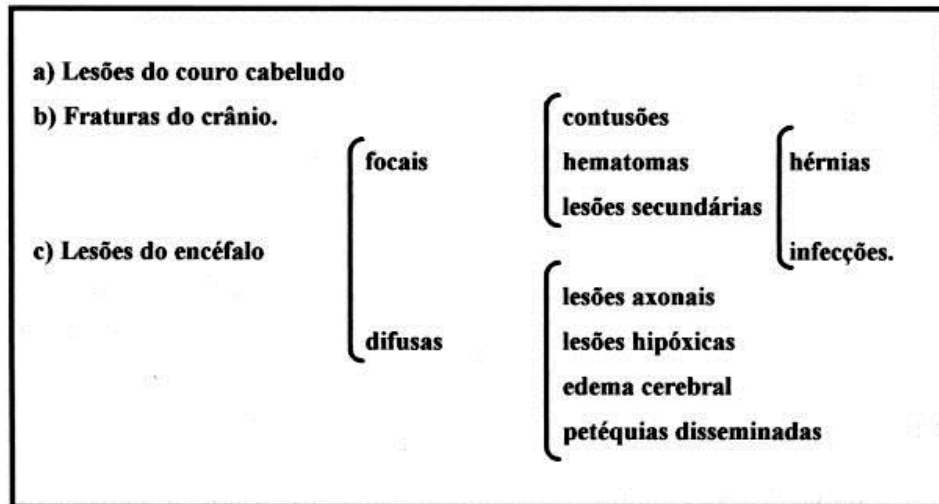


Figura 10 - Lesões que podem advir de um TCE [25]

Fraturas de crânio

Denotam a magnitude do impacto, especialmente se ocorrem na base do crânio. Porém pode haver traumas graves ou fatais sem fraturas. Adicionalmente, as fraturas de crânio formam vias para infecção precoce ou tardia, devido à exposição do cérebro ao meio externo.

A calote craniana é o principal local atingido num traumatismo aberto de crânio.

- Nas fraturas fechadas não há solução de continuidade do couro cabeludo.
- Nas fraturas abertas o couro cabeludo está lacerado sobre a fratura sendo este tipo de fraturas importantes marcadores das possíveis lesões parenquimatosas (da massa encefálica) existentes. Cerca de 80% destas fraturas são lineares, com prevalência nos ossos temporal e parietal.
- -Nas fraturas com afundamento do crânio um ou mais fragmentos ósseos são deslocados para dentro, comprimindo o cérebro subjacente. Estas fraturas comumente levam a complicações como a meningite. Mesmo quando fechadas, estas fraturas exigem tratamento neurocirúrgico.

Contusões cerebrais

São lesões traumáticas focais e superficiais causadas pela inércia entre o cérebro e o crânio no momento do trauma. A maioria das vezes são pequenas e múltiplas.

As contusões são muito comuns na face orbitária dos lobos frontais e região anterior dos lobos temporais. O relevo ósseo nestas superfícies é acentuado, formando saliências e depressões que se ajustam aos sulcos cerebrais. No decorrer de uma aceleração ou desaceleração bruscas, a inércia do cérebro faz com que este deslize sobre as irregularidades ósseas da base craniana, não importando a direção nem o ponto de incidência do impacto. Em regiões cerebrais adjacentes a superfície lisa do crânio como a calvária, as contusões são mais raras.

É usual classificar as contusões conforme sua posição em relação ao local do impacto. Quando a contusão é próxima deste, fala-se em contusão ou lesão de golpe. Quando distante ou diametralmente oposta ao impacto, chama-se lesão de contragolpe. (Figura 11)

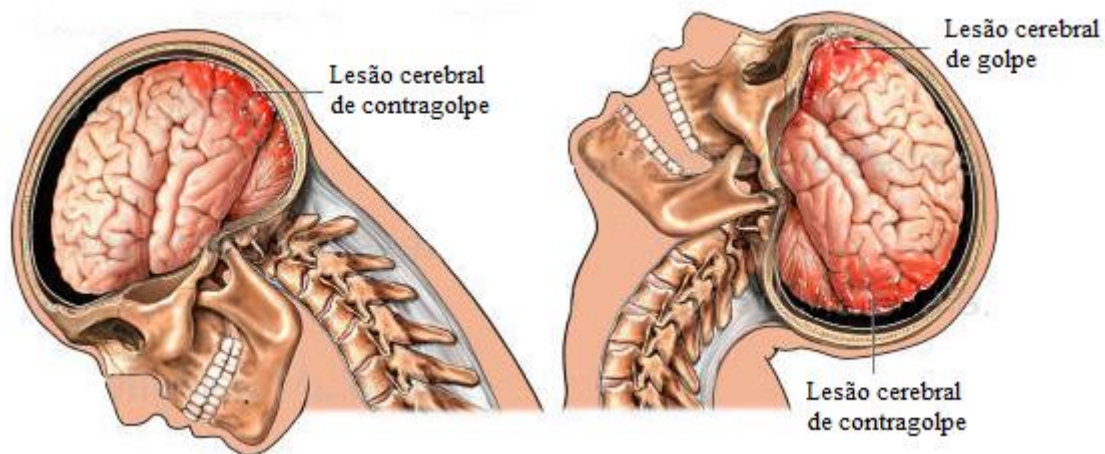


Figura 11 - Golpe e contragolpe [26]

Hematomas cerebrais traumáticos

Os hematomas traumáticos são mais graves que as contusões porque o acúmulo de sangue rapidamente causa hipertensão intracraniana e herniação cerebral. São emergências que exigem pronto diagnóstico e drenagem cirúrgica.

Há três localizações mais frequentes: o espaço epidural ou extradural (entre a dura-máter e o osso), o espaço subdural (entre a dura-máter e a aracnóide) e localizações intracerebrais. [25]

Lesão axonais difusas (LAD)

Lesões cerebrais difusas são responsáveis pela maior parte das sequelas crônicas dos TCEs, como perda das funções cerebrais superiores e estado vegetativo.

Por definição, as LAD correspondem a microrroturas de axónios na substância branca, nos grandes feixes nervosos dos hemisférios cerebrais e do corpo caloso, responsáveis pela associação de áreas corticais distantes e inter-hemisféricas

Como o cérebro é grande e mole, pode ser facilmente afetado por forças rotacionais abruptas. Estas são consideradas mais importantes que a aceleração ou desaceleração translacionais.

A consequência da lesão axonal difusa é o estado de coma, que pode ser definitivo, constituindo o estado vegetativo. Nos pacientes que recuperam do coma podem restar sequelas, como demência, espasticidade e ataxia. [25]

Concussão cerebral

Concussão cerebral (não confundir com contusão) é a perda imediata da consciência no momento do trauma, mas recuperável em 24 horas ou menos e sem sequelas.

A concussão acompanha-se de amnésia retrógrada e pós-traumática, isto é, o paciente não se recorda do trauma, dos momentos que o antecederam, nem de eventos imediatamente posteriores. Por exemplo, a vítima de um acidente automobilístico não se lembrar do acidente, nem de ter saído de casa, ou de ser levado ao hospital.

Hoje a tendência é considerar a concussão como resultante de um grau leve de lesão axonal difusa. Forças rotacionais bruscas causariam estiramento de axónios e sinapses, suficiente para causar um *black out* fisiológico, mas não lesões anatómicas permanentes. O mecanismo da amnésia retrógrada continua mal compreendido. [25]

Lesões hipóxicas difusas

O cérebro pode sofrer anóxia (por ausência de transporte de oxigénio ao cérebro) em traumatismos torácicos graves, obstrução das vias aéreas por corpo estranho ou sangue, hipotensão arterial por choque ou paragem cardíaca recuperada, distúrbios estes que são comuns em politraumatizados. A consequência da anóxia é a morte das células cerebrais. [25]

Edema cerebral pós-traumático

O edema cerebral ou aumento do teor da água cerebral é uma resposta inespecífica do cérebro a variadas agressões. Normalmente desenvolve-se nos cinco primeiros dias pós-lesão e causa aumento da pressão intracraniana, piorando a circulação cerebral e, portanto, a chegada de oxigénio aos neurónios.

O edema cerebral pode ser circunscrito (por exemplo o edema adjacente a uma contusão) ou generalizado (por agravamento clínico). [24]

2.4.3 – CRITÉRIOS DE LESÃO

Existem vários critérios para avaliar o nível de gravidade da lesão sofrida na cabeça após o impacto. Apesar de todos eles serem baseados em diferentes configurações, os critérios de lesão são usados para medir o potencial de lesão na cabeça. Estes podem ser divididos em três categorias: (i) critérios de lesão baseados em acelerações translacionais do centro de gravidade da cabeça; (ii) critérios de lesão baseados em acelerações translacionais e rotacionais do centro de gravidade da cabeça; (iii) critérios baseados em tensões e deformações dentro do cérebro.

No entanto, tal como acontece no estudo das lesões crânio-encefálicas, a discussão desta matéria não é consensual. Por esta razão, os critérios que serão abordados com maior detalhe são aqueles que são adotados pelas normas, sendo que os restantes serão enumerados e descritos brevemente.

Wayne State Tolerance Curve (WST)

Este critério foi inicialmente apresentado por Wayne e desenvolvido por diversos investigadores como Lissner et al. [27] ou Gurdjian et al. [28]. É, ainda hoje, uma base de investigação para os critérios de lesão da cabeça humana.

Trata-se de uma curva que fornece a magnitude média da aceleração tolerável pela cabeça humana na direção anterior-posterior, em função da duração da aceleração.

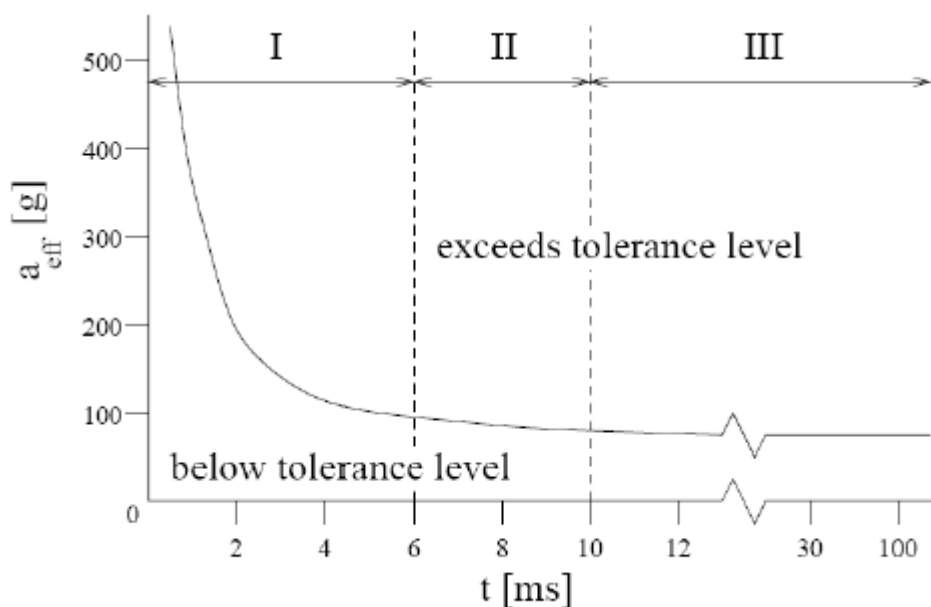


Figura 12 - Wayne State Tolerance Curve [27]

A curva WST, apresentada na Figura 12, define três áreas distintas desenvolvidas a partir de diferentes testes. Tendo em conta apenas as acelerações translacionais, foi definido um limite de tolerância humana associado a uma ligeira concussão cerebral, sem quaisquer efeitos permanentes.

A tolerância relativa à área I foi determinada recorrendo a testes em cadáveres, com fraturas lineares do crânio como critério de lesão (por ser associado frequentemente a concussões cerebrais). Relativamente à área II, testado em animais, a pressão intracraniana foi medida e comparada com humanos. A área III, por fim, foi testada experimentalmente em humanos, onde o critério de lesão foi a perda de consciência.

Neste sentido, visto que exceto para longas acelerações ($> 20\text{ms}$), a curva WST nunca foi validada por seres humanos vivos, surge a principal desvantagem deste critério. A curva foi desenvolvida tendo em conta resultados de diferentes tipos de testes, aplicados em diferentes tipos de sujeitos, sendo certo que diferentes tipos de lesão são avaliadas.

Maximum Resultant Head Acceleration (a_{max})

A aceleração máxima resultante é um critério frequentemente usado devido à sua simplicidade. O critério consiste em medir a aceleração translacional do modelo e comparar com um limite estabelecido. Contudo, os limites de a_{max} variam e estão relacionados com a sua aplicação, uma vez que a aceleração resultante é dependente do tempo. Para controlar o fator tempo, este critério é geralmente complementado por um valor da resultante de aceleração que não deverá exceder um determinado intervalo de tempo. [1]

Head Injury Criterion (HIC)

Com o passar do tempo, a curva WST começou por ser alvo de críticas. Gadd [29], inicialmente, argumentou que nem a aceleração média, nem o pico de aceleração, observado durante um impacto são suficientes para determinar, eficientemente, a resposta da cabeça aquando um impacto. O mesmo autor defende, ainda, que o risco de lesão é fortemente dependente do impulso da aceleração: impulsos com a mesma aceleração média, mas com diferentes formas, podem ter efeitos bastante diferentes.

Para considerar a forma do impulso e a sua duração, Gadd sugeriu um novo critério que consistia na integração do sinal de aceleração, num intervalo de tempo, aplicando um fator de ponderação exponencial (2,5 para impactos na cabeça). Surgia, então, o critério de lesão chamado Severity Index (SI).

$$SI = \int_0^T a(t)^{2.5} dt$$

Contudo, o SI foi alvo de críticas de vários cientistas, como Slattenschek e Tauffkirchen [30], por se desviar consideravelmente da curva WST. Com a otimização do modelo, NHTSA sugeriu um novo critério em 1972 designado por HIC [31]. Este critério conciliou a curva de WST com o critério SI, criando um novo critério que, atualmente, continua a medir o potencial de lesão na cabeça e cérebro em caso de acidentes rodoviários. Baseado na

aceleração translacional resultante, o critério calcula a probabilidade de uma lesão cerebral resultante de um impacto.

$$HIC = \left\{ \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt}{t_2 - t_1} \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{max}$$

Em que:

$a(t)$: aceleração resultante do centro de gravidade da cabeça em múltiplos da aceleração da gravidade ($g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$);

t_1 e t_2 : dois quaisquer pontos, durante o intervalo de impacto, em que o HIC é máximo [ms];

Tal como para o critério SI, o valor de 1000 é especificado para o HIC como sendo o nível de tolerância para concussão em impacto frontal. Inicialmente, o intervalo máximo de tempo ($t_2 - t_1$) foi fixado em 36 ms. Porém, este intervalo de tempo afeta fortemente o cálculo do HIC para impactos de longa duração, pelo que foi reajustado para 15ms de maneira a que o HIC fosse também aplicado em impactos em *airbags*, por exemplo.

Independentemente de ser considerado o critério mais usado para prever as lesões na cabeça, o HIC tem sido também alvo de diversas críticas recentemente. Uma limitação importante é que as acelerações rotacionais não são tidas em conta, embora, como já foi referido anteriormente, estas tenham vindo a consideradas como as principais causas de vários tipos de lesão traumáticas no cérebro [32] [33]. Além deste aspeto, em certas situações, o HIC não é um critério coerente em distinguir impactos graves e menos graves, especialmente quando impactos fortes são aplicados em várias direções. [34]

Na Tabela 4 - AIS e correspondentes valores de HIC (para um intervalo de 15ms) é apresentada a correlação entre os valores de HIC e de AIS (*Abbreviated Injury Scale*). O AIS trata-se de uma escala que vai de 1 a 6, com gravidade crescente, que associa este código a níveis de concussão cerebral e de lesão na cabeça.

Tabela 4 - AIS e correspondentes valores de HIC (para um intervalo de 15ms) [35]

HIC (15 ms)	AIS	Nível de concussão cerebral e de lesão na cabeça
135-519	1	Dores de cabeça ou tonturas
520-899	2	Inconsciente durante menos de 1 hora - Fractura linear
900-1254	3	Inconsciente durante 1-6 horas - Fractura com afundamento
1255-1574	4	Inconsciente durante 6-24 horas - Fractura aberta
1575-1895	5	Inconsciente durante mais de 24 horas - Hematoma grande
>1895	6	Não sobrevive

O HIC é o critério mais utilizado na avaliação do potencial de lesão pelas normas de testes de capacetes rodoviários. No entanto, a credibilidade deste tipo de critérios é alvo de constante

discussão pelo simples facto de os mecanismos de lesão cerebral não estarem, ainda, totalmente compreendidos.

Como tal, o HIC apresenta certas vantagens relativamente aos restantes critérios, mas também algumas limitações. Segundo Newman et. al [36], a principal vantagem deste critério é que este atenta a aceleração máxima em caso de impacto e, como considera o fator da duração do impacto, acaba por ser uma boa correlação da curva WST. Outra vantagem é que curvas de risco, ou escalas como o AIS, foram desenvolvidas para o HIC. Por outro lado, as suas grandes limitações incluem:

- O HIC apenas considera a aceleração translacional e não a rotacional, apesar de, no presente, se pensar que a grande maioria das lesões crânio-encefálicas serem mais influenciadas pela aceleração rotacional em vez da aceleração linear;
- Trata apenas de impactos frontais, não tendo sido criado para ser utilizado para prever danos oriundos de impactos laterais;
- Não tem em consideração o tipo de lesão e a massa da cabeça/capacete. A escolha do nível de tolerância depende da cabeça utilizada, da aplicação e do nível de risco de lesão associado. Por exemplo, o nível de tolerância para o HIC num capacete da norma ECE-R.22, usando uma cabeça rígida, é de 2400. Contudo, o nível de tolerância para o mesmo critério num *crash test* de carros, na norma FMVSS 208, usando a cabeça Hybrid III é de 1000.

Melvin [36] referiu ainda que o HIC é muito útil em testes de segurança em automóveis, quando não é conhecido exatamente qual o tipo de impacto e intensidade que atingirá o condutor/passageiro. No entanto, no que aos testes de segurança dos capacetes de motociclismo diz respeito, aponta que o HIC é supérfluo, devido ao alto controlo das condições de teste e da energia de impacto.

3 – CORTIÇA

3.1 – ORIGEM E SUSTENTABILIDADE

A Cortiça é um material celular natural proveniente do revestimento do tronco e ramos do sobreiro (*Quercus Suber L.*), uma árvore pertencente à família do carvalho. A importância deste material não se limita apenas nos produtos extraídos da árvore, como também é relevante em termos ambientais, atividades agrícolas e florestais ou ainda em desportos como a caça. O sobreiro é uma árvore de crescimento lento e grande longevidade, vivendo aproximadamente de 250 a 350 anos, embora a idade limite para a produção de cortiça seja de 150 a 200 anos.

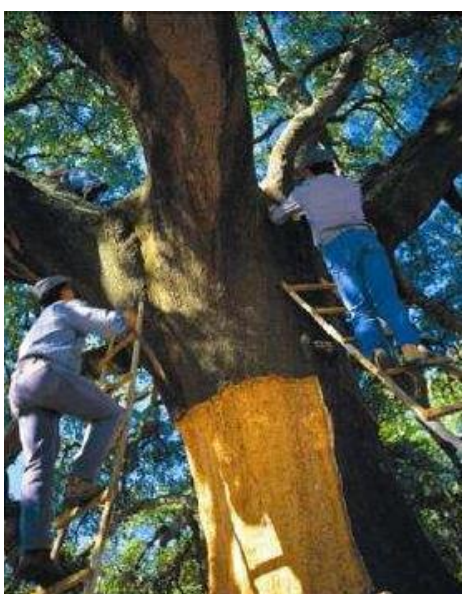


Figura 13 - Descortiçamento do sobreiro [37]

A Figura 13 mostra a operação de descortiçamento do sobreiro. A extração periódica da cortiça é um contributo fundamental na preservação da fauna e flora, sustentabilidade ambiental e, também, em termos económicos das áreas rurais da região do Mediterrâneo, em especial nos países ibéricos e norte africanos. Em termos de sustentabilidade ambiental, a exploração do sobreiro tem um impacto positivo na fixação do carbono. As florestas de sobreiros são um importante meio de retenção de dióxido de carbono (CO_2), diminuindo assim a emissão de gases estufa que provocam alterações climáticas. Quando se efetua o descortiçamento, a árvore armazena CO_2 para se auto-regenerar. Adicionalmente, um sobreiro «descortiçado» absorve 3 a 5 vezes mais CO_2 do que um sobreiro intacto sendo, portanto, a extração de cortiça um processo benéfico para a sustentabilidade ambiental. No caso de Portugal, por exemplo, os sobreiros são responsáveis pela retenção de cerca de 4.8 milhões de toneladas de CO_2 por ano. [38]

O descortiçamento do sobreiro é realizado através de operações de corte e arrancamento, tratando-se de um processo cuidadoso de modo a prevenir danos na árvore, que é considerada

um símbolo nacional. Esta extração, feita por meio de cortes tangenciais e longitudinais na casca realizados por um machado, ocorre geralmente no fim da Primavera e Verão.

Assim que a árvore atinge as dimensões consideradas pela prática de floresta, aproximadamente aos 25 anos de idade, diz-se que a árvore alcançou a maturidade e está pronta para o primeiro descortiçamento. Após a remoção da cortiça, a camada que lhe dá origem (o felogénio) é destruída. No entanto, o sobreiro tem a capacidade de regenerar e cria, no entrecasco, uma camada designada por «felogénio traumático», pois resulta de um trauma causado pelo descortiçamento. Esta camada dá origem a novas células formadoras de cortiça. O tempo necessário para o crescimento da nova camada de cortiça é aproximadamente 9 anos, podendo variar consoante as condições climáticas.

A primeira cortiça produzida pelo sobreiro designa-se cortiça virgem. Este tipo de cortiça apresenta uma estrutura e superfície irregular e, por esta razão, não é aproveitada para a produção de rolhas, sendo triturada para produção de granulado de cortiça.

A segunda camada de cortiça regenerada, ou cortiça segundeira, apesar de ser de melhor qualidade, ainda não é a ideal. Como as tensões resultantes do crescimento radial da árvore ainda são consideráveis, verifica-se um forte engrossamento do tronco e aparecem ainda fraturas na cortiça que, de um modo geral, impedem a sua utilização para o fabrico de rolhas.

Por fim, nas gerações seguintes, o sobreiro forma uma camada de cortiça bastante uniforme, com poucas fendas e de pequena dimensão, designada cortiça amadia – matéria-prima da indústria rolheira. Este tipo de cortiça, obtido aos 40-50 anos de vida do sobreiro, prolonga-se em ciclos de 9 anos até ao fim da vida ativa do sobreiro. [39]

3.2 – A IMPORTÂNCIA DA CORTIÇA: PRODUÇÃO, TRANSFORMAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO

A produção e transformação de cortiça ocupam uma posição de relevo na economia nacional, sendo Portugal líder a nível mundial em vários domínios industriais associados à indústria corticeira.

O montado do sobro tem um contributo muito importante para a economia e ecologia de vários países do mediterrâneo, ocupando uma área mundial de cerca de 2 277 700 hectares (Tabela 5 - Área do montado do sobro em diversos países).

Tabela 5 - Área do montado do sobro em diversos países [40]

País	Área (hectares)	(%)
Portugal	736 700	32.4
Espanha	506 000	22.2
Argélia	414 000	18.2
Marrocos	345 000	15.2
França	92 000	4
Tunísia	92 000	4
Itália	92 000	4
Total	2 227 700	100

A área do montado do sobro em Portugal representa cerca de 33% da área mundial de montado, o que corresponde a mais de 730mil hectares e a 23% da floresta nacional. Para vincar ainda mais esta liderança, Portugal é atualmente o maior produtor de cortiça, com a produção de mais de 150 mil toneladas anuais, o que representa cerca de 54% da produção mundial. Adicionalmente, segundo dados da *United Nations Statistic Division*, Portugal é ainda líder no que diz respeito às exportações deste material, com 60% da quota mundial – de facto, 90% da cortiça transformada em Portugal tem como destino o mercado internacional.

A indústria corticeira está dividida em 4 sectores, que são:

- **Indústria preparadora:** realiza operações posteriores à extração da cortiça, tais como a cozedura, o tratamento, o recorte, a escolha e o enfardamento.
- **Indústria transformadora:** ocupa-se fundamentalmente com a produção de rolhas e discos de cortiça naturais, provenientes da prancha de cortiça.
- **Indústria granuladora:** lida com os desperdícios originados nas atividades preparadora e transformada, procedendo à trituração dos resíduos para a produção de granulado de cortiça.

- **Indústria aglomeradora:** dedica-se à produção de aglomerado expandido puro (ou negro) e de aglomerado composto, que resulta da aglomeração de granulado através da adição de um aglutinante.

A atividade transformadora é, ainda hoje, aquela que tem mais expressão em Portugal, que detém a maior capacidade industrial e empresarial do mundo para a transformação, representando 61% dos produtos fabricos à base de cortiça, seguido pela produção de aglomerados com 33% e pela produção de granulados com 6%. [40]

Atualmente, o sector de destino mais representativo dos produtos de cortiça é a indústria vinícola, representando cerca de 60% de toda a produção de cortiça. Segue-se o sector da construção civil com 15% da quota de mercado e pela indústria automóvel com 11%. [41]

Para além do fabrico de rolhas, a cortiça, que é um material totalmente reciclável, é utilizada em muitas mais aplicações, que vão desde utensílios de cozinha, calçado, artigos de artesanato, isolantes térmicos e acústicos, juntas para motor, painéis para a industrial aeroespacial e militar, entre muitas outras.

Por tudo isto que foi apresentado, é inquestionável a importância que o sobreiro e, em particular, a cortiça têm na sociedade. Apesar de ser do conhecimento geral as excelentes propriedades que a cortiça apresenta, a sua utilização é ainda muito vaga. Nos dias que correm verifica-se uma constante substituição de materiais em muitas aplicações que melhoram a qualidade de vida das pessoas. Tal significa que poderão abrir-se à cortiça novos horizontes e novas áreas de aplicação, como é o caso da possível utilização deste material para fins de absorção de impacto.

3.3 – ESTRUTURA CELULAR DA CORTIÇA

As propriedades dos materiais estão diretamente relacionadas com a sua estrutura. Como tal, quando, em 1664, Robert Hooke aperfeiçoou o seu microscópio ótico, um dos primeiros materiais a ser observado foi a cortiça. Esta observação constitui um grande avanço na ciência e levou-o a identificar, pela primeira vez, a unidade básica das plantas e dos tecidos biológicos. A designação atribuída pelo cientista foi a palavra “célula”, derivada do latim «*cella*» que significa pequeno compartimento. Assim, as células de cortiça foram registadas em desenho pelo autor num dos livros que maior impacto teve no desenvolvimento científico do século XVII, intitulado *Micrographia*.

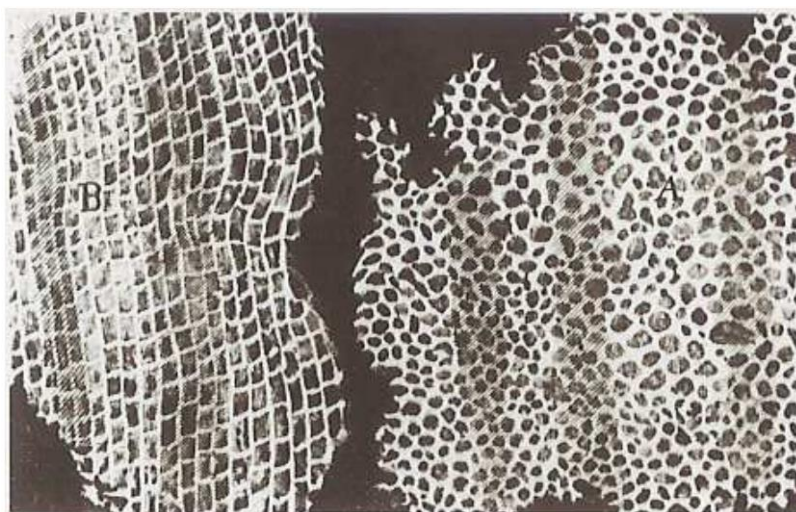


Figura 14 - Desenho de Robert Hooke da estrutura celular da cortiça [42]

Hooke foi, também, o primeiro a detetar a estrutura anisotrópica da cortiça, conforme se pode observar na Figura 14. Ao desenhar as células em duas secções perpendiculares entre si, a imagem da esquerda representa a secção de uma estrutura composta por células alongadas dispostas em fiadas contíguas, semelhantes a paralelepípedos, enquanto a imagem da direita mostra uma estrutura aproximadamente isotrópica, composta por células hexagonais. Com base nesta proposta, que posteriormente foi confirmada por outros autores como uma descrição simplista da estrutura real da cortiça, é frequente referir três direcções principais que definem a orientação da cortiça no sobreiro:

1. Direcção radial: ao longo do raio do tronco;
2. Direcção axial: paralela ao eixo do tronco;
3. Direcção tangencial: tangencial à circunferência do tronco;

Atualmente, com o avanço da tecnologia, as observações efetuadas permitem caracterizar com maior detalhe a microestrutura da cortiça (Figura 15). Segundo a direcção radial, as células apresentam uma geometria prismática, com secção pentagonal ou hexagonal, empilhadas em colunas com uma certa ondulação (forma de “concertina”). Na secção transversal, o seu aspeto é idêntico ao de um favo com a sua estrutura alveolar. A cortiça é um tecido constituído por células mortas dispostas compactamente e sem espaços livres.

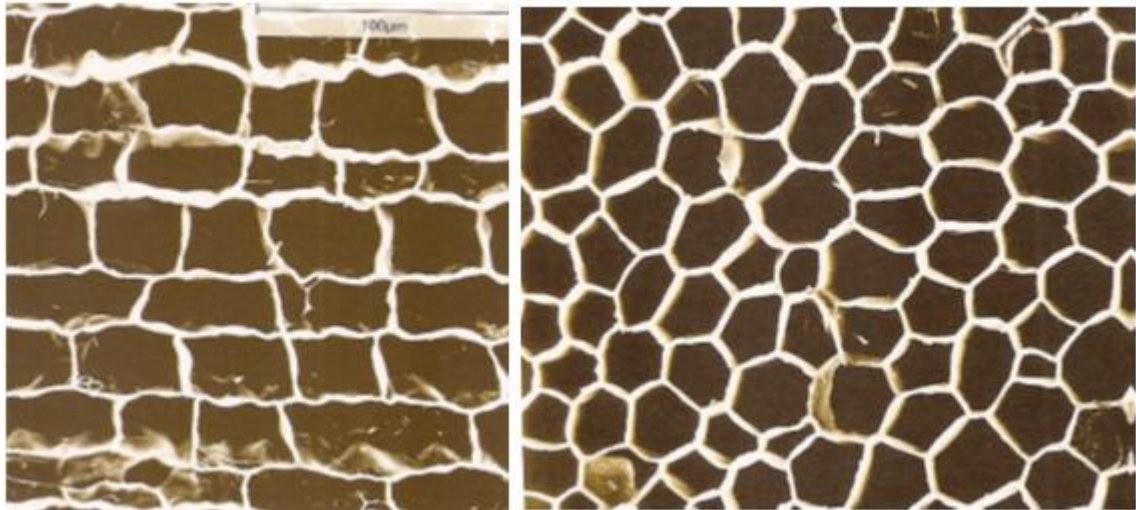


Figura 15 - Observações com microscópio eletrônico de varrimento da estrutura celular da cortiça: direção radial e tangencial [43]

Na Figura 16 é apresentada uma representação esquemática da célula de cortiça. As dimensões das células variam consoante a época sazonal em que se dá o seu crescimento: cortiça de Primavera ou de Outono. No entanto, a generalidade das paredes celulares têm uma altura aproximada de $45\mu\text{m}$, um lado de base hexagonal de comprimento de cerca de $20\mu\text{m}$ e uma espessura média de parede de $1\mu\text{m}$. Esta configuração tem uma forte influência nas propriedades mecânicas dos materiais à base de cortiça. [44]

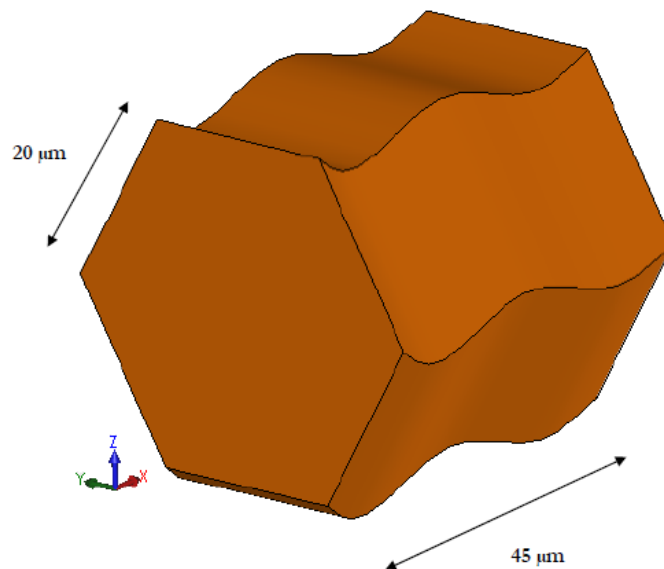


Figura 16 - Forma e dimensões médias de uma célula de cortiça. As direções OX, OY e OZ representam a direção radial, tangencial e axial, respetivamente [39]

Tal como acontece com outros materiais celulares, a cortiça é constituída por células fechadas que formam no espaço uma estrutura tridimensional, em que a fração volúmica de fase sólida que constitui as células é de 15% do volume total do material. Ao contrário da maioria dos restantes materiais celulares, que apresentam paredes sólidas constituídas por materiais metálicos, cerâmicos ou compósitos, o principal composto da parede celular da cortiça é um biopolímero como a suberina, a lenhina e a celulose. [39]

As paredes celulares da cortiça são constituídas por uma lamela média formada principalmente por lenhina, que serve de ligação entre células adjacentes, uma parede primária fortemente lenhificada e de espessura muito reduzida, uma parede secundária bastante mais espessa constituída fundamentalmente por suberina e ceras extratáveis e uma parede terciária formada à base de polissacáridos. [43]

Apesar de normalmente apenas se referir a suberina e as ceras como constituintes da parede secundária, certos estudos dão a indicação que ela também deverá conter lenhina uma vez que a parede primária e a lamela média devido às suas espessuras reduzidas não poderão conter toda a lenhina apresentada pela célula. [45]

3.4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CORTIÇA

Dada a grande variação de métodos analíticos para a determinação dos diferentes componentes da cortiça, assim como o facto das cortiças analisadas serem diferentes, a composição química média da cortiça varia de autor para autor. Na Tabela 6 - Composição química da cortiça apresentam-se alguns resultados de estudos efetuados por diversos autores.

Tabela 6 - Composição química da cortiça [46]

KLAUBER (1920) (citado por Natividade, 1950)		GUILLEMONAT (1960) (citado por Pereira, 1981)	
Composição	% da Cortiça	Composição	% da Cortiça
Suberina	58%	Ceróides	5%
Celulose	22%	Taninos	6%
Lenhina	12%	Suberina	45%
Água	5%	Celulose e outros polissacáridos	12%
Cerina	2%	Lenhina	27%
Outros	1%	Cinzas e outros	5%
LISSIA E PES (1984)		PEREIRA (1988)	
Composição	% da Cortiça	Composição	% da Cortiça
Substâncias de natureza tânica		Virgem	Amadia
solúveis em água	10%	Cinzas	0,7%1,2%
Substâncias de natureza cerosa		Extractivos	15,3%14,2%
extractáveis por dissolventes	5%	Suberina	38,6%39,4%
Substâncias saponificáveis(suberina)	45%	Lenhina	21,7%21,8%
Lenhina e celulose	30%	Polissacáridos	18,2%19,9%
Água, cinzas, etc.	10%	Monossacáridos (% do Total)	
		Glucose	50,6%45,4%
		Xilose	35,0%32,3%
		Arabinose	7,0%13,2%
		Galactose	3,6%5,1%
		Manose	2,8%3,2%
		Ramnose	1,7%0,8%

No entanto, os primeiros estudos sobre a composição química da cortiça remontam a 1787, quando Brugnatelli decidiu submeter a cortiça a um tratamento com ácido nítrico e obteve um produto que denominou ácido subérico. Mais tarde, em 1815, o químico francês Chevreul,

após extrair a cortiça com vários produtos, reparou numa substância que não se dissolvia em água nem em álcool, a que deu o nome de suberina [47].

Ainda assim, para o principal constituinte da cortiça - a suberina - a bibliografia mais recente aponta para valores próximos de 45%. Esta substância, que é responsável por grande parte das características e propriedades da cortiça, é praticamente infusível, é insolúvel na água, no álcool e na grande maioria dos solventes usuais. É, também, a presença de camadas de suberina na parede celular que, como substância de baixa polaridade e, portanto, hidrófoba, tornam a cortiça um material muito pouco permeável a líquidos e gases. [48]

Os restantes constituintes da cortiça podem ser distinguidos em dois grandes grupos: os extrativos e o resíduo lenho-celulósico.

Os extrativos ($\approx 15\%$) são, por definição, um conjunto de substâncias que podem ser dissolvidas de um material vegetal com recurso a solventes orgânicos neutros ou algo polares e água [47]. Estes representam uma fração lipocerosa que se traduz num reforço das características de impermeabilização da parede celular e, ainda, uma fração fenólico-polifenólica cujo papel parece estar relacionado com a proteção a ataques de organismos biológicos.

Por sua vez, os principais componentes dos resíduos lenho-celulósicos são, para além de cinzas e materiais azotados, os polissacáridos ($\approx 20\%$) e a lenhina ($\approx 20\%$). A suberina trata-se de um biopolímero de carácter aromático. No entanto, este termo mantém-se, ainda hoje, algo indefinido e, para diferentes investigadores, pode representar entidades macromoleculares com características diversas.

Independentemente dos diferentes resultados obtidos pelos autores, existem diferenças óbvias na composição química dos dois tipos de cortiça (virgem e amadia), principalmente no que diz respeito ao teor de suberina e de extratáveis. Outra conclusão por parte do mesmo autor indica que a localização da amostra de cortiça influencia significativamente o teor de extratáveis e polissacáridos nas cortiças virgem, embora para os teores de suberina e lenhina não tenha encontrado variações. [45]

3.4.1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO TECIDO SUBEROSO

Atualmente, acredita-se que as principais características da cortiça que a tornam um material diferente e valioso, quer como produto natural ou transformado, são resultado da estrutura do tecido suberoso e da composição química das suas paredes celulares. Como tal, sendo a suberina o principal constituinte – e o mais conhecido – da cortiça, nesta secção será feita um levantamento das principais características do tecido suberoso.

Em termos de densidade, o tecido suberoso apresenta uma densidade bastante baixa – rondando valores entre os 0,12 a 0,24 – resultante do volume das paredes das células ser aproximadamente 15% do volume total da célula. Por outras palavras, pode-se afirmar que cerca de 85% do volume da cortiça é ar ou uma mistura gasosa [49]. O peso específico normal da prancha de cortiça está compreendido entre 120 e 240 kg/m³.

Outra característica muito importante da cortiça, principalmente para a indústria dos vedantes, é a compressibilidade e a elasticidade. A grande flexibilidade das membranas celulares, devido aos baixos teores de lenhina, permite que, quando se comprime cortiça, o gás existente dentro das células comprima e a sua pressão aumentam. Desta forma, o comportamento da célula de cortiça assemelha-se ao de uma pequena almofada, verificando-se um aumento de resistência à compressão da cortiça à medida que a deformação aumenta [48]. Este comportamento é evidente numa operação de engarrafamento. Numa primeira fase verifica-se uma deformação da rolha, que resulta das forças de compressão para introduzir a rolha de cortiça na garrafa. Logo que a compressão deixa de fazer sentir, a rolha recupera elasticamente e tende a adquirir a sua forma original, passando a exercer pressão sob o gargalo da garrafa, o que confere uma boa vedação. Esta capacidade de recuperar o volume inicial, depois de sujeita a compressão, deve-se à elasticidade que o tecido suberoso apresenta. Rosa e Fortes investigaram o comportamento viscoelástico deste material, assim como a recuperação de dimensões após compressão da cortiça e concluíram que a taxa de recuperação diminui significativamente com o tempo e, por outro lado, aumenta com o grau de deformação inicial. Adicionalmente, Rosa e Reis [48] acrescentou que aglomerados de cortiça com densidade demasiado baixa poderá levar à diminuição da elasticidade.

3.5 – LIMITAÇÕES DA CORTIÇA

Como seria de esperar, os materiais que mais diretamente competem com a cortiça são outros materiais celulares, como por exemplo as espumas sintéticas. Uma vez que se trata de um material natural, a cortiça apresenta certas limitações comparativamente aos seus competidores. Por esta razão, qualquer que seja a utilização da matéria-prima suberosa – desde a prancha, granulados ou aglomerados - é fundamental compreender que tipos de defeitos afetam a qualidade da cortiça e, conseqüentemente, o seu desempenho industrial.

A limitação mais óbvia é a natureza anisotrópica da cortiça e uma grande discrepância nos valores das suas propriedades, quando medidas em diferentes amostras ou ainda em amostras retiradas da mesma prancha de cortiça. Além disso, a forma das células de cortiça varia conforme a altura do ano em que se deu o crescimento do material no sobreiro. As células de Primavera são mais longas radialmente e apresentam paredes mais finas do que as células de Outono, que são mais curtas com paredes mais espessas. O facto das células de Outono serem mais curtas e com paredes mais espessas faz com que este tipo de cortiça se torne mais resistente à flexão e encurvadura, fruto das tensões de compressão radial que surgem no crescimento da cortiça. As células de Primavera, por outro lado, apresentam paredes mais onduladas do que as células de Outono. [43]

A porosidade (Figura 17) é considerada por diversos autores como o defeito que maior importância tem na apreciação da qualidade da cortiça. Os canais lenticulares consistem num tecido com numerosos espaços intercelulares onde não há produção de células de cortiça. O número de canais e, fundamentalmente, a percentagem de área que estes ocupam estão diretamente associada à porosidade da cortiça (fração volúmica que os canais ocupam), que constitui o principal fator para a definição da qualidade de uma prancha de cortiça. No caso de a porosidade atingir valores próximos dos 6%, a cortiça designa-se por *bofe* (a porosidade da cortiça pode alcançar valores na ordem dos 30%). Este tipo de defeito é causado por canais lenticulares extremamente largos e com diâmetros superiores a 20mm. [43]



Figura 17 - Aspeto de cortiças com diferentes porosidades [49]

Há um conceito muito enraizado no meio suberícola que afirma que a porosidade diminui a densidade. Na realidade, este conceito não é totalmente verdadeiro pois, frequentemente, os canais lenticulares estão obstruídos por células muito espessas e lenhificadas, que resulta num aumento de densidade. Por outro lado, mesmo que um poro esteja completamente livre de qualquer resíduo no seu interior, as suas paredes apresentam-se mais densificadas que o resto da cortiça, pelo que Fonseca et al [50] afirma que a porosidade nem sempre é um fator de redução de densidade, antes pelo contrário, poderá aumentá-la. Quando em excesso, estas células fortemente lenhificadas refletem-se em cortiça muito densa com perda de elasticidade – cortiças *madeirentas* ou *preguentas*.

O *verde*, por sua vez, é um defeito que se refere a regiões de cortiça com elevado teor de humidade rodeadas por cortiça com teor de humidade normal (6-10%). Este defeito tem um aspeto translúcido e mais escuro que a cortiça “normal”, libertando líquido quando comprimido. Este tipo de defeitos reflete-se numa excessiva contração volúmica do material na secagem da cortiça e num aumento de densidade para valores $930 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. [51]

Há muitos mais defeitos associados à cortiça como por exemplo o *enguiado da costa*, a *esfoliação* ou ainda defeitos causados por animais ou pragas. No entanto, foi dada uma maior atenção aos defeitos anteriormente caracterizados por serem mais frequentes e, essencialmente, por terem como resultado a alteração da densidade da cortiça, que é um dos pontos mais importantes deste trabalho.

3.6 – ESTUDOS FEITOS SOBRE A CORTIÇA

Neste capítulo, faz-se uma revisão aos diversos estudos realizados num passado recente, referentes ao comportamento mecânico da cortiça, sem descrever com detalhe os resultados e conclusões alcançadas.

Os estudos realizados sobre a cortiça focam-se, maioritariamente, no seu comportamento *quasi*-estático, sendo a generalidade referente ao desempenho da rolha de cortiça no engarrafamento. A título indicativo, são exemplos os estudos sobre a viscoelasticidade, a fluência e relaxação de tensões; as publicações sobre o coeficiente de Poisson, a influência da porosidade e humidade do material; os estudos sobre atrito, amortecimento de vibrações e isolamento acústico motivado pela utilização de painéis de cortiça na indústria civil, entre outros.

Gibson et al [52] caracterizaram a deformação das paredes da célula de cortiça, assim como a sua estrutura, em ensaios de tração e compressão. Neste estudo, os autores compararam os valores do módulo de Young e as propriedades mecânicas obtidas experiencialmente com expressões teóricas, segundo as direções principais, baseadas na deformação celular. Em 1999, Gibson e Ashby [53] publicaram o livro *Cellular Solids: structure and properties* onde abordam, com detalhe, a teoria de deformação dos materiais celulares sob diversas solicitações, dando especial ênfase à cortiça. Ainda no mesmo campo de estudo, Pereira et al. [54] e Pina e Fortes [55] aprofundaram a caracterização do comportamento mecânico da cortiça estudando os mecanismos de deformação deste material, quando sujeitas a solicitações variadas.

A recuperação de dimensões, relaxação de tensões e fluência da cortiça, foram aspetos abordados por Rosa e Fortes [56]. A principal conclusão do estudo foi que a taxa de recuperação aumenta com o grau de deformação inicial, caindo significativamente com o tempo. Mais tarde, estes autores portugueses escolheram três gamas de velocidades diferentes para estudar a influência da velocidade de deformação, segundo as três direções principais do material, para caracterizar o comportamento da cortiça em compressão. Realizaram, ainda, ensaios cíclicos de carga-relaxação-descarga em compressão, nas direções radiais e tangenciais, das rolhas de cortiça.

Pina et al. [57] estudaram de que forma é que a porosidade está relacionada com o comportamento à compressão da cortiça.

A preponderância do gás no interior das células de cortiça nas propriedades mecânicas também foi alvo de estudos por parte de Fortes e Rosa [58], que asseguram que o seu contributo só deve ser considerado para deformações superiores a 70%. Outro estudo realizado pelos mesmos autores [59] analisou os modos de fratura do material quando solicitado à tração.

A absorção de água pela cortiça e os seus efeitos nas propriedades mecânicas foram estudados por Gil et al. [60]. Neste sentido, observaram dois regimes diferentes: o primeiro, onde se verificam alterações dimensionais e, o segundo, onde se apenas manifesta alteração da massa.

A absorção de água mostrou ser a causa da expansão do material. Apesar de ser apenas visível durante um curto espaço de tempo, o aumento do volume é proporcional ao aumento da massa. Nesta fase em que se deu imersão da cortiça em água, demonstrou-se que as células estavam aparentemente saturadas de água, o que resultou na penetração de água no interior das células de cortiça para tempos superiores.

Na bibliografia, existem também alguns estudos sobre cortiça aglomerada, que se divide em dois tipos: o chamado aglomerado negro (aglutinantes que resultam da degradação térmica da cortiça) e aglomerados compostos (a aglutinação é conseguida através da adição de resinas sintéticas). Gil [61] [62] analisou vários tipos de densificação de aglomerados negros e observou a estrutura resultante ao microscópio eletrónico. Conclui, então, que a densificação máxima deste material se obtém para uma pressão de 3MPa. Analisou, ainda, a influência dos tratamentos de densificação na composição química do aglomerado.

O comportamento mecânico de aglomerados compostos foi estudado por Teixeira et al. [63], que realizou ensaios de compressão e flexão em três pontos para determinar o comportamento mecânico do aglomerado, assim como a observação da microestrutura ao microscópio electrónico.

A incorporação de granulado de cortiça em argamassa polimérica, e o estudo do seu comportamento mecânico, foi realizado por Nóvoa et al. [64] através de ensaios de compressão e flexão até à rotura de diferentes argamassas, em que a variável consiste no teor de cortiça. No mesmo sentido, a autora Carvalho e Silva [65] estudou a incorporação de cortiça em argamassa a fim de melhorar a resposta sísmica de edifícios. Criou vários provetes - em que variava a fracção volúmica, assim como a dimensão do tamanho de grão de cortiça - e estudou a resposta mecânica à compressão, deformação na rotura e módulo de elasticidade inicial para realizar ensaios de modo a estudar o desempenho e a aplicabilidade destas argamassas como dissipadores de energia.

Em 2004, Fortes et al. publicaram o livro denominado A Cortiça [43]. Este livro inclui informações sobre a estrutura e composição química; sobre o seu comportamento à compressão, tracção, torção e fractura; sobre as propriedades térmicas, dieléctricas, viscoelásticas, acústicas e ao desgaste; sobre a absorção de água e aquecimento da cortiça; e ainda, de uma forma geral, informações sobre os produtos transformados à base de cortiça.

Gonçalves [1] estudou numericamente a viabilidade da implementação de um *padding* em cortiça micro-aglomerada em capacetes rodoviários. Apesar de certas vantagens, o capacete modelado com *padding* de cortiça não cumpre os requisitos de aceleração máxima do centro de massa e de HIC estabelecidos pela norma reguladora. As razões apontadas focam-se, especialmente, na excessiva densidade da cortiça e no efeito ricochete provocada pelo retorno elástico do material.

Coelho [2], por sua vez, estudou numericamente a viabilidade da implementação de um *padding* híbrido de cortiça e EPS, dando especial atenção a impactos duplos. Apesar do EPS continuar a apresentar melhores resultados em termos de aceleração máxima do centro de

massa, novamente devido à elevada densidade da cortiça, o modelo híbrido apresenta benefícios claros em multi-impactos.

Pereira et al.[66] registou uma patente, em 2009, de um processo de expansão volumétrica por exposição a radiação micro-ondas, sem a utilização de substâncias exteriores à cortiça. Os resultados publicados apontam que a cortiça, independentemente da forma ou tipo, é capaz de expandir entre 40% a 85% em termos volúmicos.

3.7 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DA CORTIÇA

Compressão

Em muitas aplicações, assim como ao longo do seu processo de fabrico, a cortiça é sujeita maioritariamente a esforços de compressão. A Figura 18 (a) apresenta a curva de compressão da cortiça amadia nas direções radial (R) e axial (NR), em que a direção tangencial não se encontra caracterizada por se aproximar bastante da curva NR. As curvas mostram a forma como varia a tensão, σ , à medida que a extensão, ϵ , vai aumentando. Este parâmetro é calculado a partir do alongamento gerado (Δl) em relação à dimensão inicial do provete (l_0), na direção de compressão. Naturalmente, por se tratar de um ensaio de compressão, é previsto que Δl seja um valor negativo, verificando-se um “encurtamento” em vez de alongamento.

Analisando a curva de compressão da cortiça, verifica-se que a direção R é consideravelmente mais rígida à compressão do que a direção NR. De registar que as curvas apresentadas são relativas a cortiças previamente submetidas a um processo de cozedura.

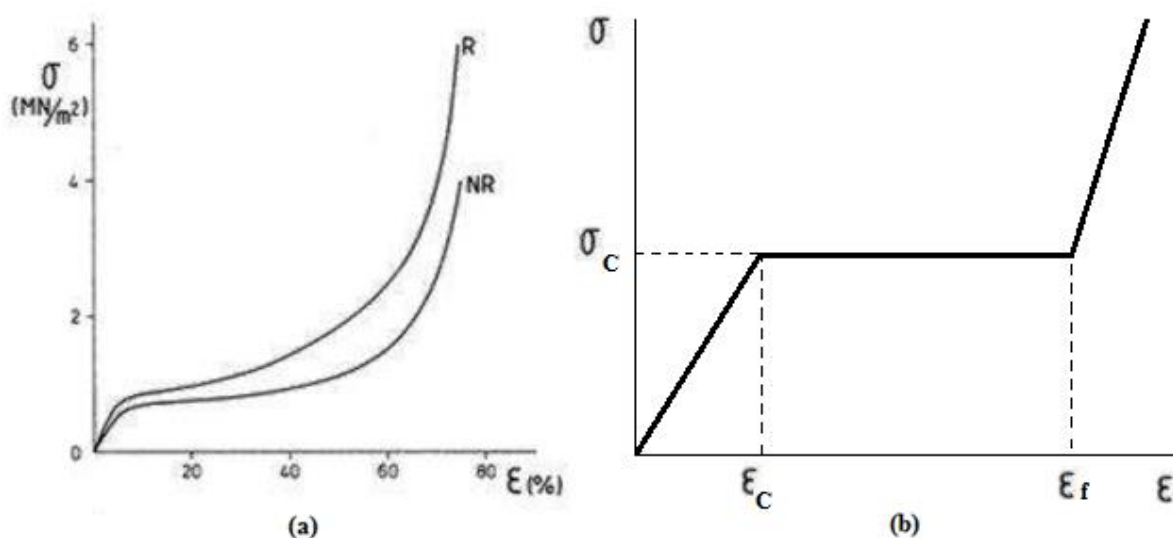


Figura 18 - Curva de compressão da cortiça: (a) curvas experimentais em compressão radial (R) e em compressão não-radial (NR) e (b) representação esquemática, evidenciando as três regiões da curva [43]

Independentemente da direção, a curva de compressão cortiça compreendem três regiões, que estão associadas a mecanismos de deformação distintos (Figura 18 (b)).

A primeira região, para tensões e deformações pequenas, apresenta um declive elevado e corresponde à deformação elástica da cortiça. Na verdade, ao contrário do que se encontra esquematizado em (b), o comportamento elástico da cortiça é notoriamente não-linear: a rigidez diminui ligeiramente na região elástica, à medida que ϵ aumenta, pelo que a curva $\sigma(\epsilon)$ tem a concavidade para baixo, como ilustrado em (a). No entanto, apesar disto, a lei de Hooke é uma aproximação viável para o cálculo do módulo de Young médio da cortiça.

Quando a tensão atinge um determinado valor σ_c , a que corresponde uma extensão ϵ_c , inicia-se a segunda região da curva onde ocorre um novo mecanismo de deformação relacionado com o colapso das células. Na Figura 18 (b) esta região corresponde a $\sigma = \sigma_c$, apesar de esta região apresentar um declive pequeno, cerca de 1 MPa. [43]

Por fim, a região intermédia «do patamar» termina para uma extensão elevada, ϵ_f , da ordem de 70%. A partir deste ponto, o declive da curva de compressão aumenta pronunciadamente, atingindo valores de 200 MPa. Nesta região, as paredes celulares colapsam, sendo que os valores finais de ϵ podem ir até 80% (isto é, um provete com 10 mm de altura fica reduzido a uma altura de 2 mm). [43]

Sucintamente, as três regiões acima referidas da curva de compressão correspondem, respetivamente, à deformação elástica (viscoelástica), ao colapso das células e ao esmagamento das células (ou densificação).

Elasticidade

O módulo de elasticidade (ou Young), como já foi referido anteriormente, é calculado através do declive da curva na região elástica (ou viscoelástica). Em virtude da anisotropia e da qualidade da cortiça, o valor do módulo varia consoante a direção R e NR e também relativamente a outras propriedades como a densidade. No entanto, os valores aproximados são $E_R = 14$ MPa e $E_{NR} = 11$ MPa, sendo que o EPS (35 kg/m^3), por comparação, apresenta 15 MPa. [43]

O ensaio de compressão unidirecional de um sólido provoca um aumento dimensional da secção transversal do material. O coeficiente de Poisson relaciona a extensão transversal (ϵ_T) com a extensão longitudinal (ϵ_L), paralela ao eixo de compressão, através do seu quociente. No caso da cortiça, devido à sua anisotropia, há que definir três coeficientes de Poisson independentes, que relacionam a deformação em relação às referidas direcções. A Figura 19 apresenta a variação de ϵ_T em relação a ϵ_L , medido experimentalmente recorrendo a extensómetros.

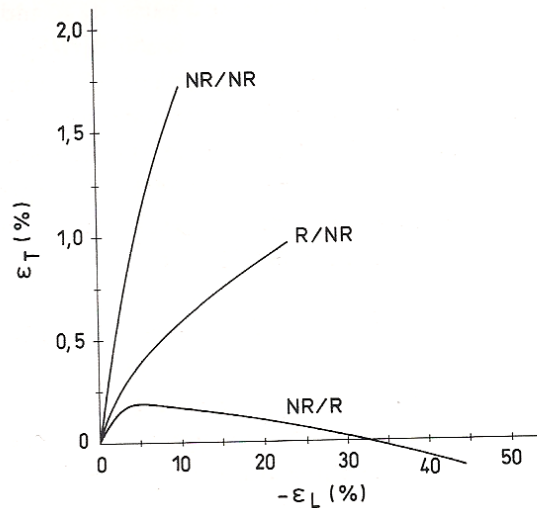


Figura 19 - Curvas experimentais do efeito de Poisson na cortiça [43]

Na generalidade, o coeficiente de Poisson dos materiais sólidos aproxima-se de 0.3 mas, no que à cortiça diz respeito, como em outros materiais celulares sólidos, este parâmetro é relativamente inferior. Com a exceção do coeficiente $\nu_{NR,NR}$, os valores dos coeficientes de Poisson para pequenas deformações elásticas são pequenos, próximos de zero. A Tabela 7 - Coeficientes de Poisson segundo as várias direções apresenta os valores dos coeficientes para a cortiça, que são os valores dos declives das curvas da Figura 19 junto à origem. [43]

Tabela 7 - Coeficientes de Poisson segundo as várias direções

$\nu_{R,NR}$	$\nu_{NR,R}$	$\nu_{NR,NR}$
0.097	0.064	0.26

À temperatura ambiente, tal como muitos polímeros, a deformação apresenta uma importante componente viscoelástica. Este aspeto tem várias consequências, especialmente no efeito da velocidade de compressão nas curvas de compressão e, também, na recuperação viscoelástica da cortiça.

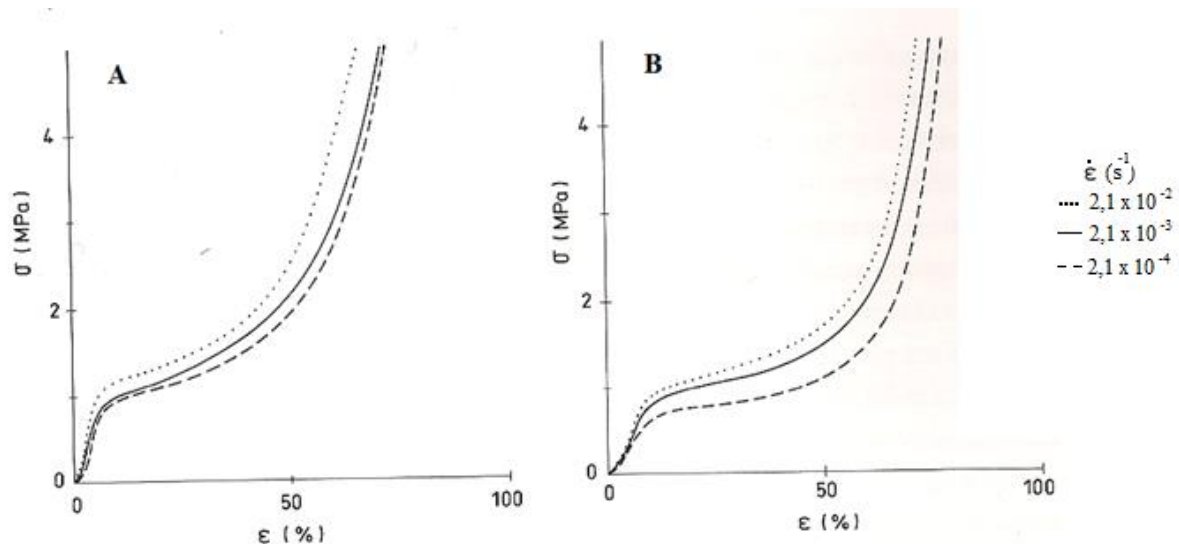


Figura 20 - Efeito da velocidade de compressão ($\dot{\epsilon}$) nas curvas de compressão da cortiça: (a) compressão radial; (b) compressão não-radial [43]

Pela análise da Figura 20, é possível visualizar que, para ambas as direções, a tensão, para o mesmo ϵ , aumenta quando $\dot{\epsilon}$ aumenta. Verifica-se, também, que o aumento de $\dot{\epsilon}$ provoca um aumento do declive da curva na parte elástica, o que revela um ligeiro aumento da rigidez. Estes efeitos de taxa de deformação estão relacionados com a componente viscosa da deformação da cortiça, que resulta dos rearranjos moleculares que ocorrem, por deformação, nas paredes celulares da cortiça. Quando ocorre deformação, as moléculas deslocam-se umas em relação às outras, dissipando energia. Assim que as forças são retiradas, as moléculas não regressam às posições iniciais. Devido a estes movimentos irreversíveis, há dissipação de energia. [43]

Capacidade de dissipação de energia

A capacidade para dissipar energia por vibração pode ser medida experimentalmente recorrendo a testes onde a cortiça é sujeita a compressão alternada e posterior descarga, com a frequência desejada.

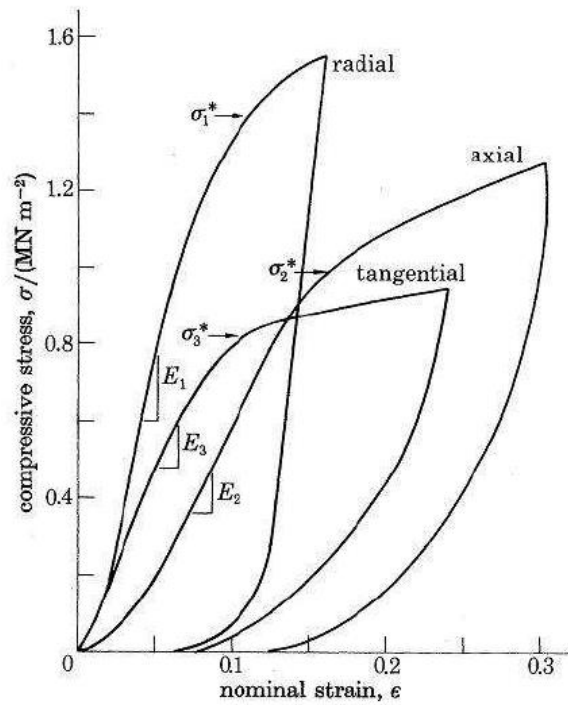


Figura 21 - Curvas tensão-deformação para cortiça testada em compressão segundo os eixos radial, axial e tangencial [52]

A Figura 21 mostra as curvas tensão-deformação para cortiça testada em compressão segundo os três eixos. Em cada ciclo, o valor da tensão de compressão é fixada no seu máximo, dando uma certa forma à parte inicial da curva. No entanto, quando as tensões de compressão são retiradas, verifica-se que a descarga origina uma curva com uma forma diferente do carregamento. Esta irreversibilidade, ou seja a não-coincidência da forma da curva nos dois momentos diferentes, implica um fenómeno de dissipação de energia, uma vez que a energia usada para atingir a tensão máxima é superior à energia recuperada na descarga (histerese).

A energia dissipada por ciclo corresponde à área formada pela curva de carregamento e descarga. O coeficiente de perda mede a capacidade de dissipação de energia e corresponde ao quociente entre esta energia e a energia despendida no carregamento. O seu valor para a cortiça é aproximadamente 0.1 para uma frequência de 2kHz sendo, por comparação, o coeficiente de perda dos metais próximo de 0.0002-0.001 e 0.08 para borrachas. [52]

Deformação da cortiça segundo as regiões da curva de compressão

A região inicial da curva $\sigma(\varepsilon)$ da cortiça diz respeito à deformação elástica e ocorre para deformações e tensões pequenas. Numa primeira fase, até que a tensão de elasticidade do material seja atingida, a deformação dá-se essencialmente por flexão das paredes e arestas das células, sendo que a deformação é praticamente reversível e uniforme. Por outras palavras, pode-se afirmar que não há localização da deformação.

A transição para a segunda região da curva, que ocorre quando σ_C e ε_C são atingidos, dá origem a um novo mecanismo de deformação relacionado com o colapso das células. Para a cortiça, $\sigma_C \approx 1\text{MPa}$ e $\varepsilon_C \approx 8\%$, sendo que estes valores podem variar muito conforme o tipo de cortiça, direcção de compressão, grau de humidade, temperatura ou rapidez de deformação. [43]

Ao atingir-se a tensão de cedência (ou colapso), as paredes celulares começam a se deformar por encurvadura elástica. A forma das células colapsadas altera-se severamente da sua forma inicial, com ondulação das paredes, sem ocorrência de fratura de uma forma geral. O processo de colapso das células neste regime é localizado, isto é, não-uniforme, ao contrário do regime elástico. Em materiais homogêneos, o colapso inicia-se numa extremidade do provete, propagando-se depois até à extremidade oposta, segundo um regime constante de tensão. No caso da cortiça, o colapso não ocorre simultaneamente em todas as células, iniciando-se nas que são menos resistentes ou naquelas que se encontram mais solicitadas. A sua propagação resulta num aumento ligeiro de tensão, devido à heterogeneidade no comprimento e, também, na espessura das paredes de cortiça. Apesar de a deformação ser irreversível, poderá registar-se alguma recuperação na descarga relacionada com a viscoelasticidade da cortiça, contudo a célula não volta à sua forma inicial. [43]

Quando a extensão atinge valores na ordem de 70%, atinge-se a parte final da curva de compressão da cortiça, designada por densificação/esmagamento das células. Esta região é caracterizada por um elevado declive $d\sigma/d\varepsilon$. As células, que sofreram solapso por encurvadura plástica na região do patamar, são agora comprimidas adicionalmente, sendo que as paredes encurvadas começam a tocar-se progressivamente, o que leva a um aumento de contactos entre células. A rigidez vai aumentando e tenderá, no limite, para a rigidez do material das paredes celulares. À medida que as células são comprimidas, o ar presente no seu interior é parcialmente libertado. No entanto, a porosidade inerente à cortiça não é eliminada completamente, continuando a existir pequenas cavidades de gás entre as células esmagadas. Considerando condições drásticas de compressão, a densificação total das células ocorre para $\varepsilon > 85\%$ (considerando a expansão lateral do provete), sendo que, mesmo neste cenário improvável, as paredes celulares da cortiça parecem manter-se intactas, não sofrendo fratura. [43]

A Figura 22 caracteriza o comportamento células da cortiça ao longo das três regiões da curva de compressão, em que é possível visualizar a deformação por encurvadura das paredes celulares, assim como a libertação parcial do gás interior.

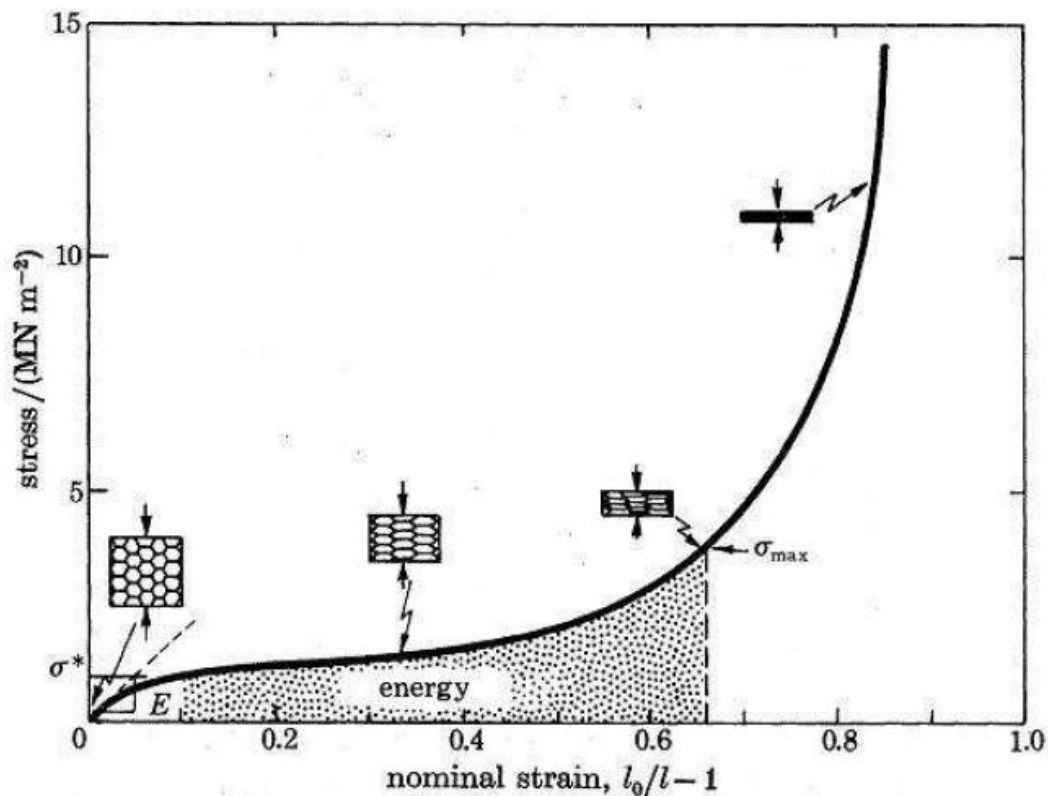


Figura 22 - Deformação das paredes celulares por encurvadura segundo as regiões da curva de compressão [52]

Efeito do ar no interior das células

Devido à natureza fechada das células de cortiça, o ar dentro das células é comprimido e a sua pressão aumenta. À primeira vista, poderia pensar-se que este “efeito de almofada” teria um contributo significativo para o aumento da resistência à compressão. Contudo, o efeito do ar apenas é considerável para deformações elevadas ($\varepsilon > 70\%$), sendo que para deformações normais a presença do gás é irrelevante. [43]

O gás dentro das células, que é possivelmente ar, pode ser tratado como um gás perfeito, pelo que o produto pV é constante (admitindo que a temperatura se mantém constante na compressão). Considerando que a pressão inicial é a pressão atmosférica ($p \approx 0,1$ MPa), no caso do volume se reduzir a metade ($\varepsilon = 50\%$), a pressão passa para o dobro, valor que é muito pequeno comparado com a tensão necessária para deformar as paredes (cerca de 1,5 MPa para $\varepsilon = 50\%$). Para extensões superiores, o efeito do ar torna-se mais importante e o seu contributo para a resistência à compressão é apreciável.

Se, em vez de gás, as células tivessem um líquido no seu interior, como acontece com as células da cortiça verde, o aumento de resistência à compressão seria significativo devido à baixa compressibilidade do líquido. [43]

A Figura 23 ilustra o efeito do ar no interior das células na curva $\sigma(\varepsilon)$ da cortiça, em que a curva a tracejado foi calculada na hipótese de não haver gás no interior das células. É possível verificar que o efeito do ar é insignificante, exceto para deformações muito grandes.

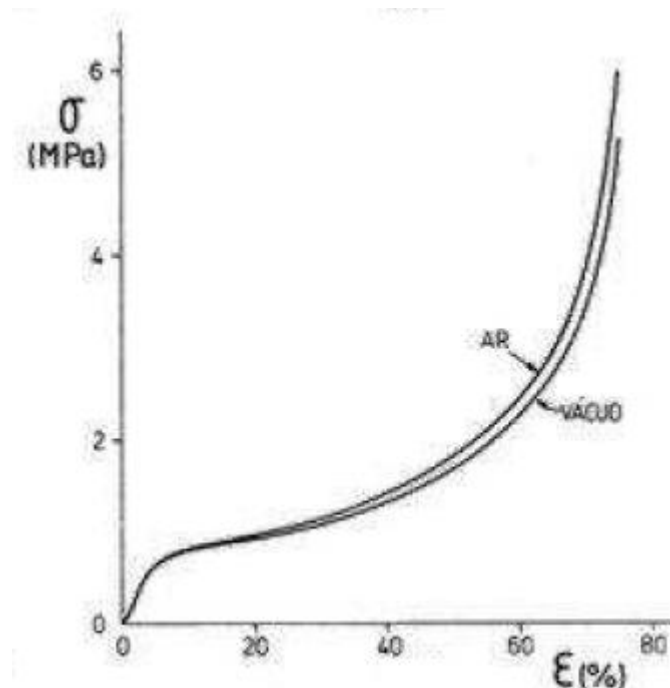


Figura 23 - Efeito do gás no interior das células na resistência da cortiça [43]

Recuperação de dimensões após compressão

Uma rolha de cortiça retirada do gargalo (com $\epsilon = 30\%$) não recupera as dimensões iniciais totalmente, mas expande-se um pouco, de tal forma que é preciso voltar a comprimi-la para a reintroduzir no gargalo.

A cortiça demonstra uma considerável resiliência no momento em que é retirada a pressão, sendo capaz de recuperar quase imediatamente 85% das suas dimensões iniciais, valor que aumenta para cerca de 93% poucas horas depois (Figura 24). Esta capacidade invulgar é mais evidente para pequenas deformações e está ligada à distinta estrutura celular da cortiça, assim como à natureza fechada das suas células.

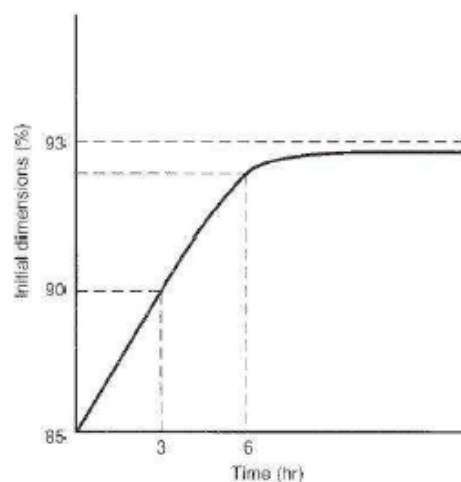


Figura 24 - Recuperação viscoelástica da cortiça sob compressão [67]

No entanto, mesmo as pequenas deformações da cortiça ($\varepsilon < \varepsilon_c$) não são completamente reversíveis devido à componente viscosa da deformação. A irreversibilidade torna-se mais evidente para deformações superiores a ε_c . A Figura 25 mostra quantitativamente a recuperação de dimensões após compressão - valores da deformação remanescente (ε_r) - após compressão radial e não-radial até $\varepsilon \approx 80\%$, na direção radial e axial.

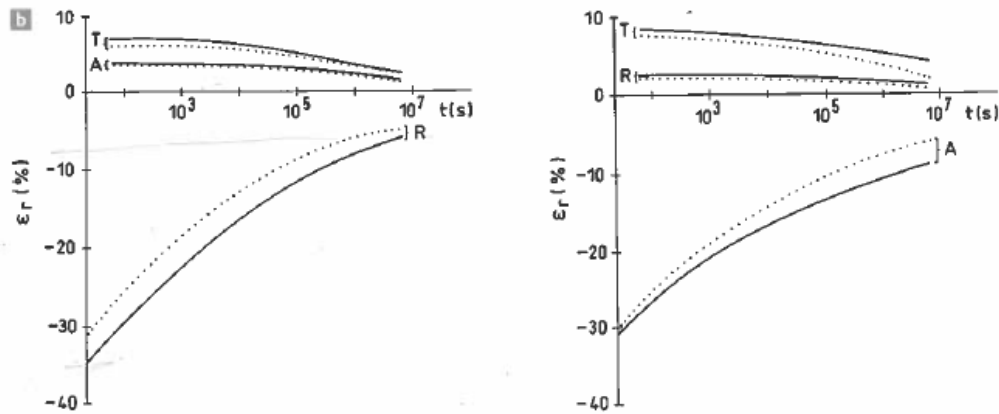


Figura 25 - Curva experimental de ε_r após compressão $\varepsilon = 80\%$ a duas velocidades $\dot{\varepsilon}$ (s⁻¹): (--) 2,1x10⁻⁴ e (...) 2,1x10⁻² [43]

Pela análise da figura, é possível verificar que a total recuperação das dimensões iniciais não é alcançada, sendo esta mais eficiente para baixas deformações. Adicionalmente, no instante em que o provete é descarregado ($t = 0$ s), verifica-se uma recuperação geométrica considerável. Também poderá haver um efeito da velocidade com que se faz a compressão, em que maiores velocidades de deformação sugerem uma recuperação mais rápida. Por fim, apesar de não ser relativo ao gráfico, é de notar que o aumento da temperatura acelera e estimula a recuperação, a tal ponto que, por exemplo, uma rolha retirada de um gargalo recupera as suas dimensões iniciais se for colocada dentro de água a ferver. [43]

3.8 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS

Nesta secção é apresentado uma patente do processo de expansão de cortiça por exposição a radiação micro-ondas desenvolvido por Pereira et. al. [66] Como já foi referido anteriormente, a grande limitação da cortiça, em comparação com o EPS, foca-se na sua excessiva densidade. Por esta razão, este processo de expansão é motivo de interesse uma vez que, possivelmente, resultará em cortiça menos densa.

A invenção consiste num processo, e no resultante material, que permite a expansão volumétrica de cortiça sem a utilização de substâncias externas à cortiça. Concretamente, a exposição de cortiça a radiação micro-ondas leva à expansão da cortiça, aumentando o seu volume e preservação da massa inicial, o que levaria a uma diminuição de densidade. A descoberta deste processo representa vantagens extremamente relevantes, pois permitiria uma produção altamente económica da cortiça, além de abrir novos horizontes a este material em termos de aplicações que necessitem de menor peso específico – como por exemplo a camada interna dos capacetes de motociclo.

Caracterização da metodologia utilizada

De acordo com a patente referida, a cortiça pode ser submetida ao processo de pré-expansão independentemente da sua forma, origem, qualidade ou pré-tratamentos que tenham sido feitos. Isto é, cortiça virgem, secundeira ou amadia na forma de prancha, resíduos de cortiça (resultantes da produção de rolhas ou transformação das pranchas), cortiça granulada ou pó de cortiça, qualquer um destes tipos no estado cozido ou não-cozido.

O processo pode ser utilizado na vertente contínua ou descontínua tendo que percorrer três etapas: a primeira é a dosagem do material, o segundo estágio é a expansão e a etapa final refere-se ao arrefecimento e descarga da cortiça.

Relativamente ao processo contínuo de expansão de cortiça, a potência utilizada no micro-ondas deve ser, preferencialmente, entre 400W e 800W, para períodos de exposição entre 10 segundos e 5 minutos (recomenda-se intervalos mais curtos de cerca de 15 a 50 segundos). O estudo refere ainda a importância crucial da presença de humidade para que a cortiça expanda, uma vez que a radiação incide nas moléculas de água. As amostras de cortiça devem ter uma humidade superior a 5%, o que pode ser alcançado pela simples imersão em água a uma temperatura entre 25°C e 100°C ou através recorrendo a um autoclave com temperaturas entre 100°C e 150°C.

No caso do processo não-contínuo de expansão de cortiça, o estágio de expansão pode ser realizado em um ou em vários ciclos. O número de ciclos a considerar pode variar entre 2 e 15, sendo aconselhada a utilização de 2 a 5 ciclos. A duração destes ciclos pode variar entre 2 segundos e 15 minutos sendo, no entanto, aconselhada a utilização de ciclos de duração entre 2 segundos e 1 minuto. A potência aconselhada do micro-ondas continua a ser entre 400W e 800W, assim como a grande importância da presença de alto teor de humidade na amostra de cortiça.

Resultados

A patente apresenta vários casos de estudo experimentais em que se verificam resultados promissores. A submissão de cortiça ao processo de expansão via radiação micro-ondas por períodos de tempo entre 5 segundos e 5 minutos, mostra uma expansão volumétrica na ordem dos 40% a 85% em relação às dimensões iniciais da amostra. Durante este estudo, não se observou expansão em amostras cujo teor de humidade fosse inferior a 5%.

Caso de estudo 1:

Duas amostras de cortiça com forma cúbica foram submetidas a radiação micro-ondas com 550W de potência. A primeira amostra foi inserida no micro-ondas durante 25 segundos contínuos e, por sua vez, a segunda amostra foi exposta à radiação em cinco ciclos de 5 segundos cada. A expansão observada foi, respetivamente, de 48% e 46%.

Caso de estudo 2:

Duas amostras de cortiça com forma cúbica foram submetidas a radiação micro-ondas com 550W de potência. A primeira amostra apresentava uma humidade de 1.4%, enquanto a segunda amostra apresentava 7-10%. A expansão observada foi, respetivamente, 0.6% e 40-45%. Estes resultados sublinham a importância da humidade para o sucesso do processo.

Caso de estudo 3:

Amostras cúbicas de cortiça foram submetidas a radiação micro-ondas (550W), após imersão em água a diferentes temperaturas e diferentes períodos de tempo. Os resultados detalhados da expansão, assim como as condições de serviço, são apresentados na Tabela 8 - Condições de serviço e expansão volumétrica verificada para amostras humidificadas por imersão em água.

Tabela 8 - Condições de serviço e expansão volumétrica verificada para amostras humidificadas por imersão em água [66]

Amostra	Imersão em água			Micro-ondas			Expansão Total (%)
	Temp. (°C)	Tempo (min.)	Expansão (%)	Potência (W)	Tempo (s)	Expansão (%)	
A	25	325	2	550	25	37	39
B	40	20	-	550	25	-	56
C	100	15	24	550	25	28	64

Caso de estudo 4:

Duas amostras cúbicas de cortiça virgem e amadia foram submetidas a radiação micro-ondas após humidificação em autoclave para diferentes períodos de tempo. Os resultados detalhados da expansão, assim como as condições de serviço, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Condições de serviço e expansão volumétrica verificada para amostras humidificadas em autoclave [66]

Amostra	Autoclave				Micro-ondas			Expansão Total [%]
	Humidade Inicial [%]	Tempo [hr]	Expansão [%]	Humidade Intermédia [%]	Potência [W]	Time [s]	Expansão [%]	
Virgin	5,9	1	41,2	47,5	750	17	30	85,5
	11,1	14	32,4	127,2	750	17	24,8	57,1
Amadia	6,4	1	28,5	63,5	750	17	20,9	55,2
	9,9	14	19,4	140	750	17	21,8	41,3

4. METODOLOGIA

4.1 – INTRODUÇÃO

A atualidade mostra uma constante substituição de materiais nas diversas aplicações com vista à melhoria, sobretudo, dos níveis de qualidade de vida da sociedade. A cortiça é um material que tem sido utilizado pela Humanidade desde há 5000 anos. Contudo, só nos últimos anos é que as suas potencialidades têm vindo a ser realmente utilizadas, quer seja na indústria dos vedantes, construção, música, desporto, artigos de quinilharia, indústria automóvel, aeronáutica, etc. Apesar de todos estes exemplos, é do consenso geral que este material natural de propriedades singulares apresenta, ainda, um potencial por explorar.

Estudos recentes, como os realizados por Teixeira et al. [1] [2], mostram que a utilização do micro-aglomerado de cortiça em dispositivos de segurança com fins de absorção de energia em impacto, nomeadamente num capacete de motociclo, pode ser benéfica. Apesar do amortecimento, para o impacto inicial, de uma camada pura de EPS registar índices de aceleração (g) inferiores, a proteção para um segundo impacto não é garantida. Logicamente que numa situação real de colisão, o motociclista é frequentemente projetado contra um obstáculo e ainda embate no asfalto, sendo necessária proteção para multi-impactos. A proposta híbrida de EPS e MAC de Teixeira et al., devido ao comportamento elástico da cortiça, consegue ultrapassar este problema. No entanto, uma vez que a camada de micro-aglomerado de cortiça (293 kg/m^3) apresenta um peso específico muito superior à camada de EPS (50 kg/m^3), o capacete tornar-se-á consideravelmente mais pesado, o que origina um novo problema uma vez que serão registados níveis g mais elevados. É, então, necessário estudar uma forma de conseguir baixar o peso específico da cortiça.

Este capítulo encontra-se dividido em três partes distintas. Numa primeira fase, será testada, de forma experimental, a possibilidade de expansão do granulado de cortiça através da exposição a micro-ondas, anteriormente mencionada em 3.8. Tendo em conta os resultados desta primeira análise, segue-se o fabrico dos provetes com diferentes gamas de densidade e composição variável. Finalmente, o comportamento mecânico ao impacto de baixa velocidade dos provetes será estudado recorrendo a ensaios experimentais.

Para proceder aos testes experimentais, o Grupo Piedade, sediado em Fiães (Santa Maria da Feira, Portugal), mostrou-se totalmente recetivo em disponibilizar as suas instalações e recursos necessário, assim como a experiência e conhecimento técnico sobre a cortiça.

4.2 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS

Antes de iniciar os ensaios experimentais, é fundamental caracterizar o estado primário do granulado de cortiça. Os parâmetros com maior repercussão no comportamento do granulado são a granulometria, humidade relativa e densidade aparente.

4.2.1 – CARACTERIZAÇÃO DO GRANULADO

Análise granulométrica

O granulado de cortiça extraído da produção apresenta algumas variações nas suas propriedades, especialmente no tamanho de grão. As três granulometrias que serão analisadas, por si só, apresentam um erro inerente: na gama de 4-7mm, por exemplo, é desconhecida a quantidade de partículas com tamanho de grão de 4mm ou 7mm, o que representa uma grande variância. Futuramente, quando se testar a viabilidade da expansão volumétrica da cortiça, é imperativo verificar com exatidão o possível crescimento de grão, pelo que é fundamental fazer uma análise granulométrica antes, de modo a minimizar erros.



Figura 26 - Crivo utilizado para a análise granulométrica

A análise granulométrica de um granulado de cortiça consiste simplesmente em separar uma amostra desse granulado em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre os limites correspondentes às malhas dos peneiros correspondentes. O equipamento apresentado na Figura 26 designa-se por crivo, que ao vibrar juntamente com a ação da gravidade permite separar os grãos de cortiça em intervalos mais curtos. O resultado desta análise é apresentado sob a forma de percentagem da massa retida em cada peneiro, conforme é apresentada nas Figura 27, Figura 28 e Figura 29. A análise granulométrica foi realizada em conformidade com a norma NP ISO 2030.

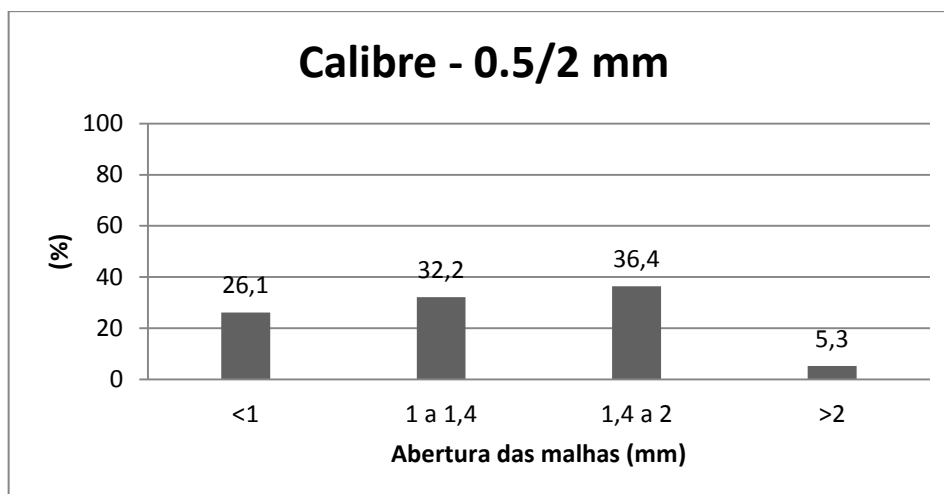


Figura 27 - Distribuição granulométrica para granulado de 0,5 a 2mm

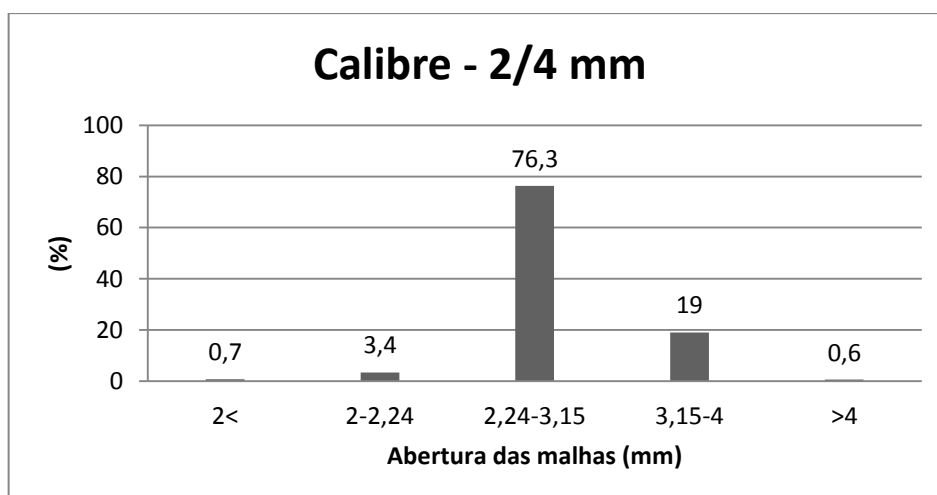


Figura 28 - Distribuição granulométrica para granulado de 2 a 4mm

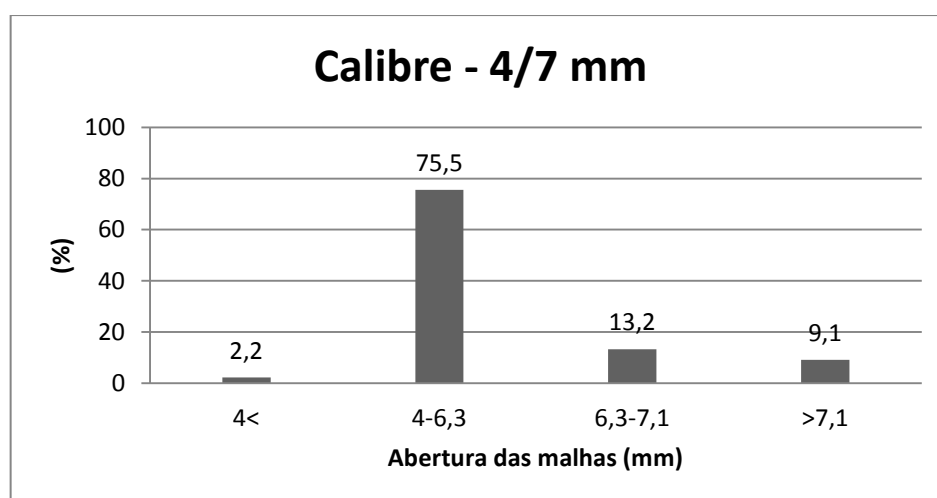


Figura 29 - Distribuição granulométrica para granulado de 4 a 7mm

Densidade aparente

Outra propriedade que é importante caracterizar é a densidade aparente do granulado. Por definição, a densidade aparente designa a massa de determinado sólido granulado por unidade volúmica, desconsiderando os espaços vazios entre os grãos, geralmente preenchido por ar ou outro fluido. Na maioria dos casos, esta propriedade apresenta um valor mais baixo do que a densidade do sólido propriamente dita. Mais uma vez, será importante registar o valor da densidade aparente do granulado para comparar com os valores obtidos pós-expansão para verificar se, de facto, os grãos aumentam de volume.



Figura 30 - Recipiente cúbico normalizado

A determinação da densidade aparente dos granulados de cortiça utilizada para este estudo foi realizada em conformidade com a norma NP ISO 2031. Sucintamente, a medição consiste em acomodar o granulado, exclusivamente via gravidade, num recipiente cúbico de massa (Figura 30) previamente determinada com 1dm³ de capacidade. De seguida, com a ajuda de uma régua de madeira retira-se o excesso de granulado, nivelando a superfície com as paredes do cubo. Por fim, registar a massa recorrendo a uma balança com a resolução de 0,5g. Na Tabela 10 - Densidade média aparente para as diferentes granulometrias são apresentadas as densidades médias aparentes para cada calibre de granulados.

Tabela 10 - Densidade média aparente para as diferentes granulometrias

Granulometria [mm]	Densidade aparente média [kg/m ³]
0.5-2	52
2-4	60
4-7	65

Humidade

Para a determinação da humidade, em vez de seguir o processo analítico referido na norma NP ISO 2190, foi sugerido a utilização de um higrómetro e do equipamento *aqua-boy*, que estão representados, respetivamente, na Figura 31.



Figura 31 - Higrómetro e Aqua-boy

Uma amostra de granulado de cortiça é colocada no higrómetro e, de seguida, o dispositivo deve ser bem apertado. Depois de conectar o higrómetro com o *aqua-boy*, o valor da humidade é devolvido numa escala de 0 a 30%. O princípio de medição da humidade é baseado na condutividade elétrica do material sólido. De uma forma simples, uma carga elétrica é emitida ao material e, em função da resistência à condutividade, determina a humidade relativa, com um erro máximo $\pm 0.1\%$. Os valores de humidade média são apresentados na Tabela 11 - Humidade média para as diferentes granulometrias.

Tabela 11 - Humidade média para as diferentes granulometrias

Granulometria [mm]	Humidade média [%]
0.5-2	7
2-4	7
4-7	6

4.2.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE EXPANSÃO

Na ausência de uma norma que caracterize o ensaio de expansão volumétrica da cortiça, os testes serão realizados com base na metodologia sugerida pela investigação de Pereira e Reis *et al.*, descrita em 3.8.

Tendo em conta que algumas variáveis não se encontram definidas no estudo, sobretudo relativamente à quantidade da amostra e humidificação da cortiça, numa primeira fase várias tentativas foram executadas para tentar otimizar os parâmetros da cozedura. De forma a evitar erros de medição, a quantidade de granulado durante todo o processo é constante, isto é, a quantidade que é humidificada será a mesma amostra que vai ser expandida. Desta maneira, é possível quantificar o volume inicial (antes da humidificação) e compara-lo, com precisão, com o volume final (depois da expansão).

Amostra: granulado de cortiça.

Tamanho de grão: três granulometrias diferentes 1-2, 2-4, 4-7 (mm).

Humidificação: panela de pressão e imersão em água à temperatura ambiente.

Tempo de humidificação: 10 min e 60 min – panela de pressão; 5 horas - imersão em água.

Razão de $V_{\text{água}}/V_{\text{granulado}}$: variável.

Pressão: 50 kPa.

Tempo de arrefecimento e estabilização: 30 min.

Expansão micro-ondas: tempo contínuo e em ciclos.

A Figura 32 apresenta um esquema que ilustra o procedimento completo de teste, desde a caracterização da amostra, a cozedura e o processo de expansão no micro-ondas.



Figura 32 - Síntese do procedimento de ensaio

Humidificação do granulado de cortiça

O processo de expansão propriamente dito começa com a humidificação do granulado. Esta etapa é determinante para o sucesso do trabalho experimental pois, segundo Reis, Pereira *et al.* a presença de alto teor de humidade na amostra é fundamental para que possa ocorrer expansão. Dois tipos de humidificação foram testados: imersão em água à temperatura ambiente e cozedura com recurso a uma panela de pressão. Uma vez que a autoclave disponível no laboratório era de dimensões exageradamente grandes, foi decidido utilizar uma panela de pressão tradicional, em alumínio, com fundo para indução.

Os tempos de humidificação recomendados em 3.8 foram mantidos. Isto é, 10 minutos e 60 minutos no caso da humidificação com panela de pressão e, por sua vez, 5 horas à temperatura ambiente para a imersão em água.

Durante os testes realizados segundo esta metodologia, a grande dificuldade foi a otimização da quantidade de água necessária a introduzir na panela de pressão, que está diretamente relacionada com o tempo de cozedura e volume da amostra, para uma potência da placa de indução constante. Para isso, a razão volumétrica de água e cortiça foi variada de forma a obter uma humidificação na ordem dos 20-30%, que representa a escala máxima do Aqua-boy. Outras razões volumétricas foram testadas; no entanto, o granulado ficava saturado/encharcado, o que depois se refletia em tempos de exposição ao micro-ondas muito altos.

Expansão em micro-ondas

Depois da amostra devidamente humidificada, procedeu-se à exposição da cortiça à radiação micro-ondas. A potência do micro-ondas estabelecida é de 800W e é constante em todos os ensaios. Por sua vez, como já foi referido anteriormente, o volume de granulado que será introduzido no micro-ondas é exatamente o mesmo que foi humidificado.

Este processo será realizado em dois tipos diferentes: contínuo e em ciclos. Para o processo em contínuo, o tempo de exposição é de 5 minutos. Adicionalmente é testada a hipótese de expandir o granulado recorrendo a 5 ciclos de 1 minuto cada, com o objetivo de acompanhar a evolução do processo e se existem diferenças, em termos de expansão, entre os dois tipos em causa.

A amostra de cortiça será introduzida num gobelé que, seguidamente é exposto à radiação micro-ondas. De forma a avaliar, numa primeira fase, a expansão volumétrica verificada, o critério consiste em efetuar uma marca (Figura 33) com um marcador na superfície da amostra, antes de a introduzir no micro-ondas, para identificar o volume pré-expansão. Apesar do gobelé não ser o instrumento mais indicado para fazer medições volúmicas, como não se trata de uma medição rigorosa, não será associado um erro grosseiro de leitura.

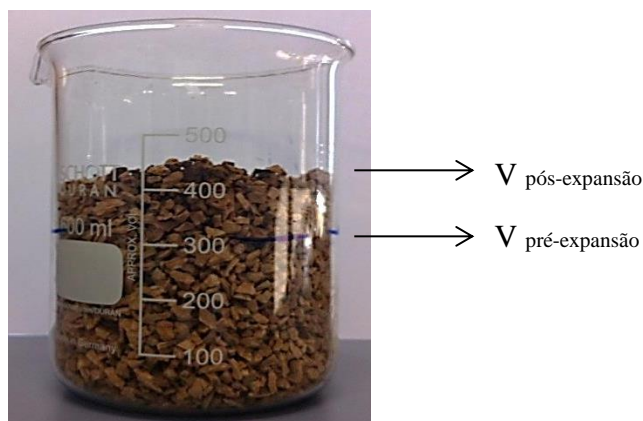


Figura 33 - Identificação do volume pré-expansão

Como é também possível visualizar na Figura 33, a taxa de expansão volumétrica será calculada consoante a nova superfície da amostra, que representa o volume pós-expansão. A taxa de expansão volumétrica aparente é, então, calculada de acordo com a equação:

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{V_{\text{pós-expansão}} - V_{\text{pré-expansão}}}{V_{\text{pré-expansão}}} \times 100$$

No entanto, este método de cálculo da expansão serve apenas como uma primeira abordagem. Para analisar o crescimento de grão, de uma forma efetiva, submete-se a amostra a nova análise granulométrica que será comparada com a análise granulométrica padrão para o calibre em causa.

Apesar da análise granulométrica acrescentar mais alguma precisão na leitura dos resultados, este método pode, ainda assim, ser insuficiente. Devido à diferente abertura das malhas dos peneiros, e ao intervalo criado entre dois peneiros, não é garantido que a expansão resulte num crescimento de grão suficiente para que grão mude de peneiro. Para melhor compreensão, será considerado o seguinte exemplo. Um grão de cortiça com diâmetro nominal de 4,5mm estaria inserido, na análise granulométrica inicial, no peneiro 4-6,3 mm. Após ser submetido ao processo de expansão, não é garantido que o grão cresça o suficiente para passar ao próximo patamar (6,3-7 mm) o que levaria a concluir que, apesar de ter crescido um pouco, não se tinha verificado qualquer crescimento de grão.

Por esta razão, a expansão volumétrica será medida recorrendo ao princípio de Arquimedes. Este princípio permite o cálculo do volume de partículas sólidas com formato irregular através da imersão do material num fluido.



Figura 34 - Representação esquemática do princípio de Arquimedes

A Figura 34 representa esquematicamente o procedimento da operação. Ao mergulhar os grãos de cortiça na proveta, que contém um determinado volume de água conhecido, ocorrerá uma subida do nível do fluido. Esta variação corresponde ao volume do granulado. Com esta metodologia, será possível estudar efetivamente a variação volumétrica comparando os volumes do mesmo granulado antes e após expansão.

No entanto, uma vez que uma das características da cortiça é a flutuabilidade em água, é necessário adaptar a proveta. De forma a garantir que os grãos de cortiça permaneçam completamente imersos, foi acrescentado à proveta um funil metálico acoplado a um disco com pequenos orifícios. Como é possível observar na Figura 35, estes orifícios permitem a passagem de água mas não os grãos de cortiça. Deste modo, a compactação da amostra não altera as condições de ensaio.



Figura 35 - Proveta adaptada para aferir a expansão volumétrica dos grãos de cortiça

4.3 – PRODUÇÃO DOS PROVETES

Nesta secção são descritas as diferentes etapas que foram consumadas até à criação dos provetes para a realização do ensaio prático de impacto a baixa velocidade. Antes de iniciar a produção dos provetes, foi necessário averiguar, por um lado, a existência de uma norma que caracterizasse provetes à base de cortiça, assim como o processo de fabrico mais adequado para a sua produção. Foram criados diferentes tipos de provetes, tendo em conta que a sua composição varia, que foram agrupados em classes. Desta forma, neste capítulo, faz-se ainda a respetiva caracterização de cada classe de provetes.

4.3.1 – NORMAS

A primeira questão levantada no dimensionamento dos provetes prendeu-se com a possibilidade de existir uma norma que esclarecesse o modelo mais adequado para a criação de provetes em cortiça. Para o efeito, recorreu-se à pesquisa de normas em documentação bibliográfica, como também no domínio da Internet. Por outro lado, uma vez que Portugal se trata de um dos países com mais experiência na produção e transformação desta matéria-prima, fez todo o sentido contactar entidades reconhecidas nesta área, como o Instituto Português da Qualidade (IPQ), um organismo nacional que se dedica a atividades de normalização, ou a CETE Cork, de forma a encontrar uma norma para a criação de provetes em cortiça.

Surgiu, ainda, a hipótese de consultar a base de dados do organismo nacional de normalização através da Direção Regional de Economia do Norte (DRE-Norte). No entanto, o resultado de todo este processo de pesquisa não se revelou proveitoso, pelo que não foi encontrado nenhum documento que fosse elucidativo da metodologia a utilizar.

De forma a contornar esta questão, a metodologia a utilizar no dimensionamento dos provetes inspirou-se em estudos realizados, num passado recente, nesta mesma área. Um estudo [1] focou-se em analisar, recorrendo a *software* de simulação numérica, o comportamento de um novo revestimento à base de cortiça para aplicações de absorção de energia em capacetes de motociclo. Apesar de serem óbvias as diferenças entre uma simulação numérica e um estudo experimental, foi decidido que os provetes de cortiça seriam fabricados em concordância com as dimensões utilizadas neste estudo numérico (Figura 36).

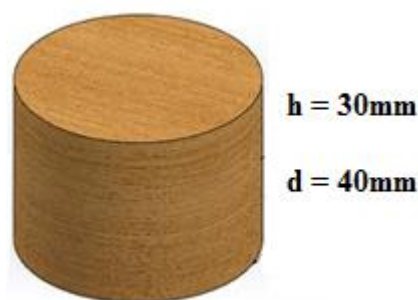


Figura 36 - Dimensões dos provetes

4.3.2 – PROCESSO DE FABRICO

Atualmente, a indústria da cortiça, para a produção de rolhas, utiliza maioritariamente dois processos de fabrico: moldação e extrusão. O processo de extrusão consiste na alimentação de um fuso que faz com que a matéria-prima (mistura de granulado de cortiça e resina) atravesse uma matriz, criando, desta forma, o designado bastão de cortiça. Posteriormente, o bastão será cortado e retificado nas dimensões das rolhas. Por outro lado, a moldação consiste na injeção do material num molde aquecido, de forma a acelerar o processo de cura da resina, para que a matéria-prima aglomere e adquira a forma pretendida.

Para o fabrico dos provetes, a extrusão é inaplicável por ser um processo altamente industrializado que requer uma instalação de grandes dimensões. Além do mais, o diâmetro típico das rolhas de cortiça são menores do que o requerido para os provetes e, por razões económicas, é impensável parar o processo produtivo de uma indústria para fazer o *setup* da máquina com uma nova matriz. Também no caso da moldação, os moldes industriais não são compatíveis com as dimensões dos provetes. Por sua vez, a criação de um molde personalizado para os provetes é economicamente mais viável, quando comparando ao processo de extrusão. Tendo em conta estas considerações, a única solução encontrada para o fabrico dos provetes foi recorrer à moldação. Decidiu-se, portanto, escolher um processo inspirado no que é atualmente utilizado pela indústria corticeira para fabricar rolhas aglomeradas: moldação manual individual. Para isso, foi necessário projetar um molde com intuito de produzir exclusivamente os provetes.

O objetivo do trabalho passa por criar provetes com diferentes materiais e diferentes pesos específicos para que, numa fase seguinte, seja possível analisar a influência destes parâmetros com a capacidade de absorver energia numa situação de impacto. Relativamente à composição química de cada classe de provete, este parâmetro é determinado na fase de preparação da mistura (matéria-prima + resina). No entanto, para a mesma classe de provete é, também, necessário variar o peso específico das amostras. Para tal, é necessário que o molde seja flexível ao ponto de aplicar diferentes razões de compactação no material. A solução encontrada consiste em acrescentar volumes de material com as mesmas dimensões do molde final para que, desta forma, a razão de compactação aplicada pelo cilindro varie.



Figura 37 - Molde construído para produção dos provetes de cortiça aglomerada

O molde (Figura 37, representando uma razão de compactação 4:1) desenvolvido em aço macio S10, uma vez que não é requerido grande complexidade geométrica e temperaturas elevadas, permite controlar o enchimento do molde, ajustando o número de volumes utilizados no enchimento. As cavidades do molde foram projetadas com o dobro do comprimento dos provetes (acrescidas de uma pequena tolerância) de forma a aumentar a cadência do processo: desta forma, por cada moldação são produzidos dois exemplares.

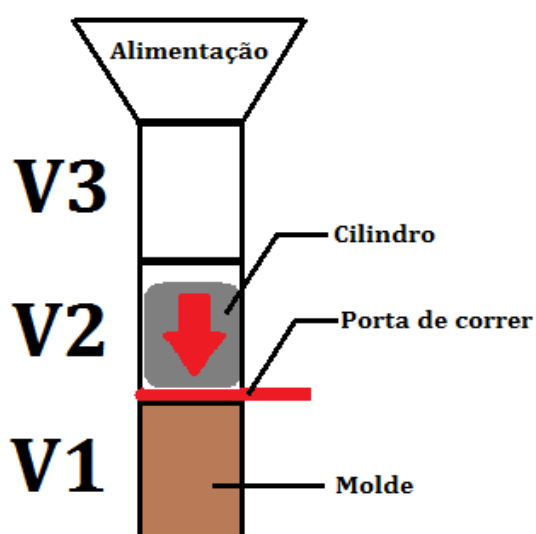


Figura 38 - Esquema ilustrativo de uma razão de compactação volumétrica 3:1

O esquema da Figura 38 ajuda a compreender a mecânica do processo. Neste exemplo, três volumes de materiais são compactados no volume do molde final. Três volumes foram construídos para que, adicionando ou retirando secções, seja possível produzir provetes com três razões de compactação possíveis: 2:1, 3:1 e 4:1, isto é, dois volumes comprimidos em um volume e assim sucessivamente.

O modo de funcionamento é muito simples. Antes de fazer a mistura das matérias-primas (para evitar que a resina comece a aglomerar a mistura), é necessário fazer o *setup* do molde estipulando, então, o número de volumes a utilizar na moldação. Os volumes individuais são acrescentados ao molde através de parafusos laterais. De seguida, procede-se à realização da mistura, num recipiente, nas devidas proporções através de um misturador manual. Estando a mistura pronta e certificando-se que a porta de correr do molde está na posição aberta, alimenta-se os diferentes volumes. Recorrendo a uma prensa hidráulica manual (Figura 39), o cilindro faz a compactação do material. Quando a posição final é alcançada pelo cilindro (V1), corre-se a porta para que o material fique retido no molde e extrai-se o cilindro hidráulico.




Figura 39 - Prensa hidráulica manual utilizada

Desaparafusada a cavidade V1, coloca-se o molde na estufa de aglomeração durante 45 minutos, a uma temperatura de 125°C. A temperatura funciona como catalisador da reação de cura da resina, que faz com que o material aglomere em menos tempo.

Passado o tempo de cura, a próxima etapa é a extração do provete da cavidade. Para facilitar a extração, o molde foi revestido com uma camada de 1mm de politetrafluoretileno (PTFE), vulgarmente designado por *teflon*®. Este revestimento antiaderente tem um efeito desmoldante. No entanto é fundamental que o molde, depois de colocado na estufa, esteja exposto às condições atmosféricas durante 15min para que o material estabilize. Posto isto, a sua extração é feita utilizando a prensa hidráulica e procede-se à catalogação da amostra.

4.3.3 – CARACTERIZAÇÃO DOS PROVETES

A 41 - 2



Tipo de mistura Razão de compactação N° do exemplar

específico próprio dos dois componentes, fazer uma mistura uniforme revelou-se uma tarefa extremamente complicada – de facto, os grãos de EPS, por serem muito mais leves, vinham à superfície enquanto os grãos de cortiça ficavam no fundo do recipiente de mistura. Várias tentativas para melhorar a mistura foram levadas a cabo, como tentar transformar as esferas de EPS em pó ou envolve-las, antes de proceder à mistura, numa pequena camada de resina de forma a aumentar a sua massa, mas todas se revelaram inconsequentes. Apesar de ser impossível criar um provete uniformemente distribuído, a única solução possível foi controlar a quantidade exata de cortiça e EPS por provete. Ao contrário do que foi realizado nas misturas A e B, houve uma alteração da metodologia da mistura. Por haver uma diferença considerável no peso específico, desta vez a distribuição dos dois componentes foi feita tendo por base a percentagem volúmica, e não mássica: 70% de cortiça e 30% de EPS. Também a percentagem de cola foi aumentada para 15% da massa total da mistura, para garantir total adesão entre grãos.

Para cada tipo de mistura, foram moldados provetes nas três variantes da razão de compactação: 2-1, 3-1 e 4-1.

4.4 – ENSAIOS DE IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE

O objetivo do presente estudo é avaliar as potencialidades de núcleos à base de cortiça para aplicações de absorção de energia a baixas velocidades. Para isso, foram construídas três classes de provetes de cortiça aglomerada, com diferentes composições, em que no âmbito de cada classe a densidade é variada. Desta forma, será possível comparar o comportamento dos diferentes núcleos no ensaio de impacto a baixa velocidade.

4.4.1 – CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS ENSAIOS

De momento, não há nenhuma norma de ensaio disponível para o teste de impacto de núcleos de cortiça aglomerada a baixa velocidade. Os ensaios foram conduzidos utilizando a máquina de testes Rosand IFW 5 HV (Figura 41) do Laboratório de Ensaio Tecnológicos, que se encontra nas oficinas do departamento de Engenharia Mecânica – FEUP. O equipamento utiliza uma massa de impacto de 3.774 kg, acoplada a um projétil de 16mm de diâmetro com ponta hemisférica, sendo o conjunto libertado desde uma determinada altura até embater no provete, que se encontra colocado num suporte metálico. A energia do impacto é ajustada através da variação da altura inicial do conjunto, sendo a variação da força de impacto ao longo do tempo registada através de uma célula de carga. O equipamento é, também, capaz de reter o impator após o primeiro impacto, através de um sistema pneumático, para que o segundo impacto seja impedido.

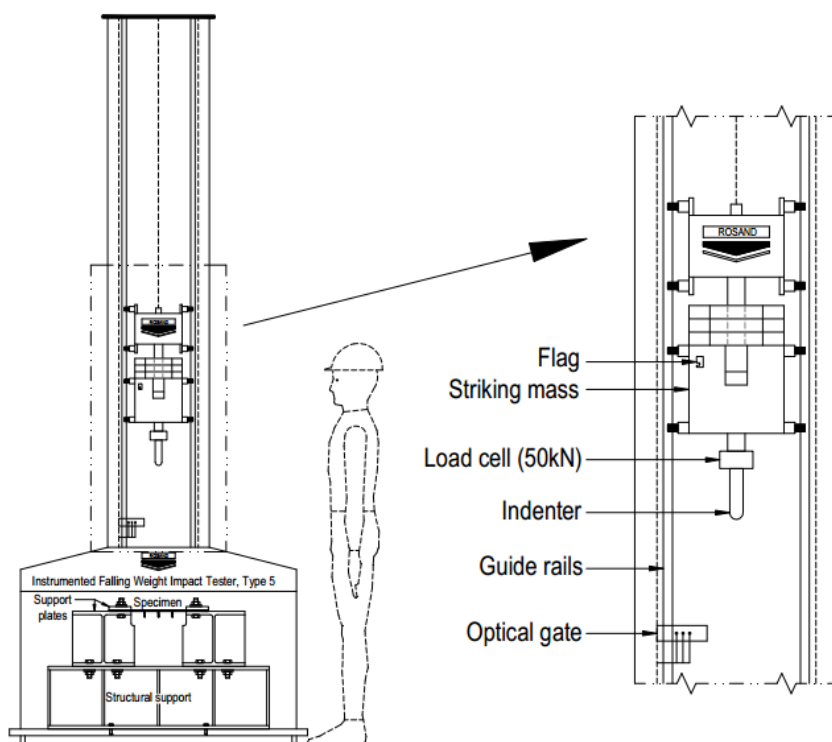


Figura 41 - Componentes da máquina Rosand IFW 5HV

Neste trabalho experimental, foram utilizados provetes cilíndricos da classe A, B e M com dimensões normalizadas: D40 mm x 30mm. Os núcleos de cortiça aglomerada foram expostos a três gamas de energia de impacto diferentes (5J, 25J e 40J), uma vez que se pretende estudar o comportamento individual dos provetes a baixas, intermédias e altas energias. A Tabela 12 resume as condições de impacto para estes níveis energéticos.

Tabela 12 - Condições do ensaio de impacto a baixa velocidade

Energia de impacto (J)	Altura de impacto (m)	Velocidade de impacto (m/s)
5	0,135	1,62
25	0,675	3,64
40	1,081	4,60

A análise comparativa foi realizada energia-a-energia relativamente a provetes do mesmo tipo. Uma vez que o estudo compreende um compromisso entre a capacidade de absorção de energia de impacto e baixo peso, em vez dos tradicionais gráficos força-tempo, serão apresentados os valores específicos da força e energia, ao longo do tempo. Adicionalmente, a informação do gráfico do ensaio é complementada por uma tabela onde estão registadas as propriedades absolutas relevantes para o estudo: massa do provete e os valores máximos da força, energia, distância de penetração e tempo de ensaio.

O objetivo proposto passa por, para cada gama de energia, seleccionar o provete de cada classe com melhor desempenho em termos de absorção de energia e, posteriormente, comparar as três soluções.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – EXPANSÃO DA CORTIÇA POR EXPOSIÇÃO A RADIAÇÃO MICRO-ONDAS

Os resultados de interesse, no âmbito do estudo da expansão da cortiça por exposição a radiação micro-ondas, são apresentados e discutidos nos parágrafos que se seguem. A Tabela 13 apresenta os dados genéricos e resultados do cálculo da expansão aparente do granulado de cortiça, enquanto a Tabela 14 se refere ao cálculo do volume segundo o princípio de Arquimedes; os gráficos da Figura 43, Figura 44 e Figura 45 comparam a distribuição granulométrica das amostras expandidas e não-expandidas.

Analisando a Tabela 13 - Sumário das condições procedimentais do teste de expansão e resultados obtidos é possível retirar várias conclusões tendo em conta a expansão volúmica aparente. Este resultado consiste na percentagem entre o volume, lido diretamente no gobelé de ensaio, de dois estados diferentes: humidificado e pós-expansão. A partir da análise deste parâmetro, verifica-se que apenas as amostras humidificadas durante 10min revelaram expansão volúmica significativa.

Assim, pode-se afirmar que o tempo de humedificação de 60 minutos, tal como a quantidade de água na cozedura, se revelaram excessivos, visto que a cortiça estava saturada de água. Este aspeto pode ser a principal justificação para o insucesso destes ensaios, uma vez que o tempo de expansão em micro-ondas (5 minutos) é insuficiente para que a expansão ocorra – mesmo no estado pós-expansão, a humidade final apontava para valores muito próximos do máximo. Por tudo isto, considera-se que o tempo de 10 minutos de cozedura, numa proporção de 1 litro de água para 10 litros de cortiça, é muito mais adequado.

Outro aspeto interessante é verificar que a expansão não apresenta diferenças relevantes considerando a granulometria das amostras e o tipo de exposição em micro-ondas. A expansão aparente resultante, apesar dos diferentes calibres testados, é sempre da mesma ordem de grandeza: os valores convergem para 30%. Esta proximidade dos valores experimentais leva a crer que o tamanho de grão inicial da cortiça não influencia a taxa de expansão. Relativamente à expansão contínua e em ciclos, os resultados também são bastante próximos. No entanto, observando com maior rigor, verifica-se que a taxa de expansão em ciclos é ligeiramente inferior à expansão contínua, assim como se confirma que o valor da humidade final é superior para este tipo de ensaio. Supostamente, a justificação para a diferença de valores prende-se com o facto de haver uma interrupção entre cada ciclo do processo. Ao fim de cada ciclo, a amostra é retirada do micro-ondas de forma a fazer uma leitura visual da evolução do processo. Apesar de terem uma curta duração, os intervalos provocam uma queda da temperatura no interior do micro-ondas, contrastando com a expansão em contínuo em que a temperatura do micro-ondas aumenta gradualmente com o passar do tempo. Por outras palavras, pode-se considerar que o tempo de 5 minutos em contínuo resulta numa exposição mais eficaz.

Tabela 13 - Sumário das condições procedimentais do teste de expansão e resultados obtidos

Calibre (mm)	Humidificação			Micro-ondas				Resultados			
	Tempo [min]	V _{água} / V _{cortica}	Humidade Intermédia	Tempo [min]	V _{amostra} [ml]	Potência [W]	Humidade Final	Expansão volúmica aparente [%]	Expansão volúmica Arquimedes [%]		
1-2	60	1/4	>30	5	300	850	24	≈ 5	0		
				1 x 5 ciclos			27	≈ 0			
	10	1/10	26	5			9	≈ 30			
				1 x 5 ciclos			13	≈ 25			
2-4	60	1/4	>30	5			24	≈ 5			
				1 x 5 ciclos			26	≈ 0			
	10	1/10	26	5			10	≈ 30			
				1 x 5 ciclos			14	≈ 25			
	Imersão em água 5 horas		>30	10			22	≈ -15			
				QUEIMOU							
	4-7	60	1/4	>30			5	23		≈ 5	0
							1 x 6 cycles	26		≈ 0	
10		1/10	27	5			10	≈ 30			
				1 x 5 ciclos			13	≈ 25			

Adicionalmente, é importante mencionar que, ao longo da exposição no micro-ondas, diferentes fases se vão sucedendo. Inicialmente, ao fim de um minuto de exposição, a linha da superfície do granulado mantém-se na mesma posição. Por sua vez, geralmente durante o período de 1-3 minutos é que se regista a expansão volúmica da amostra, pelo que a superfície de granulado já se encontra acima do ponto de referência. Durante os dois minutos seguintes não se verifica nenhuma alteração assinalável no volume da amostra, sendo que este período final é responsável, essencialmente, pela desumidificação da amostra e consequente acomodação dos grãos.

Quanto à amostra imersa em água, não é possível retirar conclusões. Os grãos de cortiça encontravam-se demasiado húmidos pelo que, estranhamente, até se verificou uma contracção do volume de cortiça quando retirado do micro-ondas. Possivelmente, os 10 minutos de exposição são insuficientes para que ocorra a expansão, pelo que o que acontece é a libertação de água da cortiça. No entanto, o ponto de referência inicial nem sequer foi atingido no fim do ensaio. Em termos de expansão em ciclos, o tempo de exposição no micro-ondas foi excessivo, visto que no final a amostra estava queimada (Figura 42). Contudo, ao avaliar o nível da linha de referência no final de cada ciclo, não se verificou qualquer expansão.



Figura 42 - Granulado queimado

Tal como já foi referido anteriormente, o parâmetro da expansão volúmica compara o tamanho de grão aparente entre a amostra humidificada e após a exposição ao micro-ondas. Entre estes dois estados, é possível visualizar prontamente que os grãos de cortiça crescem. Contudo, o fundamental da questão consiste em investigar se há crescimento de grão entre o granulado no estado normal (saído da produção) e após a expansão. Para isso, é necessário estudar a distribuição granulométrica das amostras e comparar o volume de granulado não-expandido e expandido, recorrendo ao princípio de Arquimedes.

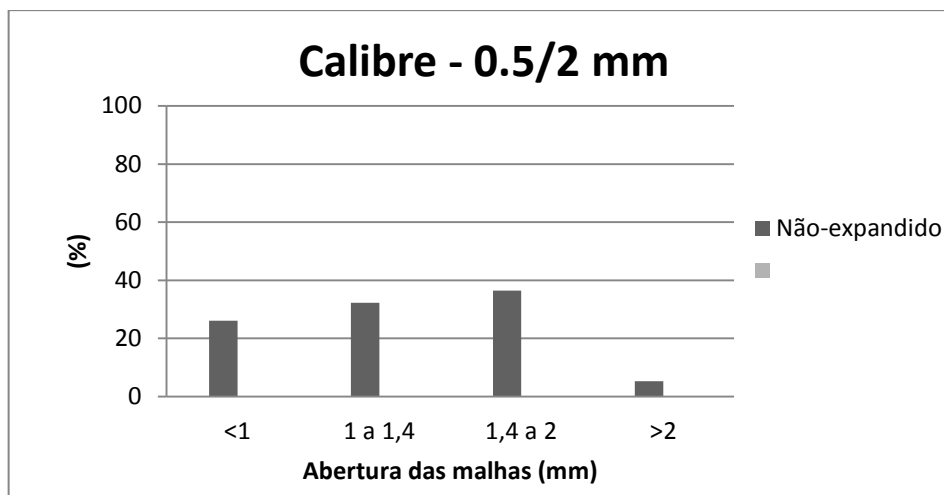


Figura 43 - Distribuição granulométrica para granulado de 0,5 a 2mm expandido e não-expandido

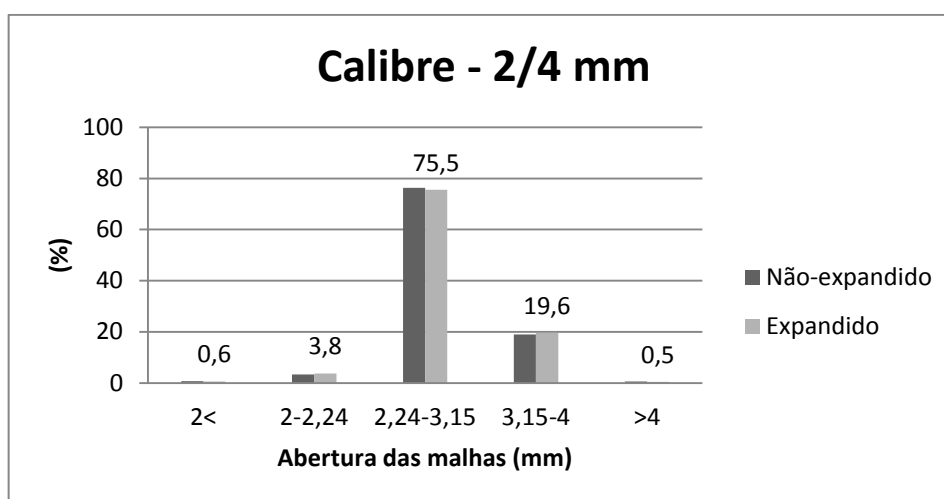


Figura 44 - Distribuição granulométrica para granulado de 2 a 4mm expandido e não-expandido

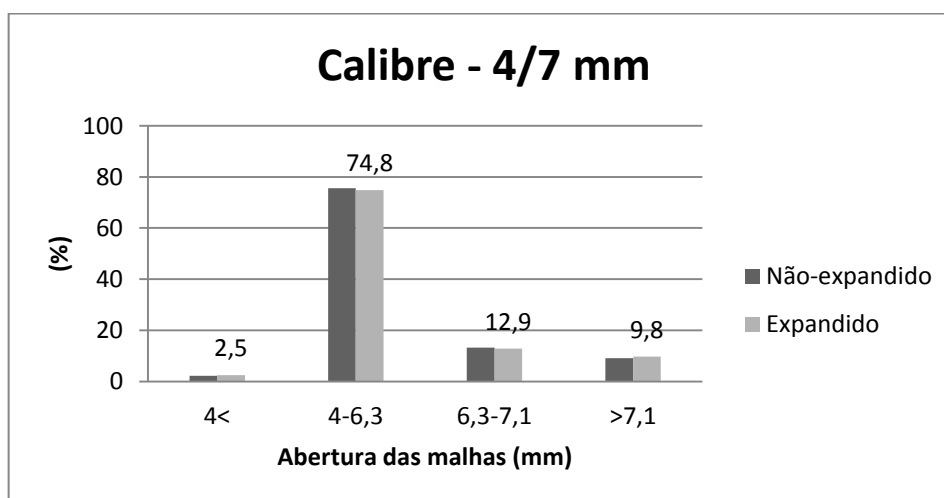


Figura 45 - Distribuição granulométrica para granulado de 4 a 7mm expandido e não-expandido

O resultado da distribuição granulométrica reflecte uma proximidade entre os tamanhos de grão dos dois estados. Ignorando as pequenas variações que seriam obtidas em qualquer análise granulométrica, pode-se afirmar que, ao contrário do que era esperado, não se verifica um crescimento de grão assinalável: a curva de tendência mantém-se na mesma posição quando era suposto deslocar-se para a direita, caso houvesse expansão. Esta conclusão estende-se à totalidade dos calibres testados, não havendo diferenças relevantes para todos os casos. A imagem do que foi explicado na secção 4.2.2, estes resultados não excluem totalmente a hipótese de haver, de facto, crescimento de grão.

Tabela 14 - Valores medidos experimentalmente segundo o princípio de Arquimedes para volumes

Calibre [mm]	Estado	$V_{amostra}$ [ml]	$V_{água}$ [ml]	V_{total} [ml]	ΔV [ml]	Expansão [%]
1-2	Normal	500	500	710		0
	Cozido			690	-20	
	Expandido			710	0	
2-4	Normal	800	500	850		0
	Cozido			810	-40	
	Expandido			840	-10	
4-7	Normal	500	500	750		0
	Cozido			700	-50	
	Expandido			740	-10	

A Tabela 14 resume os dados importantes relativos à medição de volumes segundo o princípio de Arquimedes. O propósito desta atividade experimental é comparar o volume do granulado de cortiça nos três estados: normal, cozido e expandido. Desta forma, será possível verificar se houve, de facto, expansão dos grãos. Os valores foram lidos diretamente das provetas com o maior rigor possível, o que não invalida que haja um erro mínimo implícito, pelo que possivelmente se deveria ter utilizado amostras maiores.

O fato de se terem utilizado diferentes volumes de cortiça e água para os vários calibres não é um fator de erro, pois o fundamental é assegurar que estas quantidades sejam constantes para os três estados de cada tipo de granulado.

O que se observa é que, independentemente do calibre do granulado, ocorre sempre uma contração dos grãos de cortiça no processo de humedificação/cozedura. Esta redução de volume é pouco significativa e semelhante para os diferentes casos de estudo sendo, aproximadamente, igual a -4%.

Quando medido o volume da cortiça expandida, regista-se um aumento do volume comparativamente ao estado cozido, o que era esperado tendo como base os valores da expansão volúmica aparente anteriormente discutido. No entanto, ao confrontar os volumes expandido e normal, verifica-se que o ΔV é aproximadamente nulo.

A ilação que se pode retirar deste facto é que a exposição em micro-ondas provoca uma recuperação volúmica dos grãos húmidos até ao tamanho de grão natural da cortiça retirada da produção. Em suma, a expansão que anteriormente se visualizava à vista desarmada, no gobelé introduzido no micro-ondas, é enganosa e apenas aparente uma vez que, relativamente ao estado normal do granulado, não ocorre qualquer tipo de expansão para as condições experimentais descritas.

O ponto central desta investigação é averiguar se a expansão de granulado de cortiça por exposição a radiação micro-ondas é viável, com vista à redução da excessiva densidade da cortiça relativamente ao EPS. Contudo, apesar da preocupação em seguir o protocolo descrito em [66], os resultados experimentais obtidos são contraditórios, sendo as razões do insucesso desconhecidas. Concluindo, este processo de expansão de cortiça não será utilizado para a produção dos provetes, pelo que é necessário estudar outras opções para reduzir a densidade da cortiça aglomerada.

5.2 – PRODUÇÃO DOS PROVETES

A caracterização e resultados obtidos através da moldação estão compilados na Tabela 15.

Tabela 15 - Características gerais dos provetes

Energia	Classe	Massa (g)	Peso Específico (kg/m³)
5J	A21	6,7	178
	A31	9,0	239
	A41	10,1	267
	B21	5,5	145
	B31	8,7	230
	B41	9,5	252
	M21	5,6	148
	M31	7,1	188
	M41	9,1	241
25J	A21	6,7	178
	A31	9,0	239
	A41	10,1	267
	B21	5,5	145
	B31	8,7	230
	B41	9,5	252
	M21	5,6	148
	M31	7,1	188
	M41	9,1	241
40J	A21	5,3	140
	A31	9,1	242
	A41	9,6	255
	B21	6,2	165
	B31	8,3	221
	B41	12,2	324
	M21	5,0	133
	M31	6,6	176
	M41	9,2	245

Verifica-se pequenos desvios entre provetes da mesma classe, que podem ser justificados uma vez que se trata de um processo de enchimento e moldação manual. No entanto, após vários ensaios, foram obtidos valores relativamente próximos de peso específico e que são considerados válidos, visto que o erro implícito é inferior a 10%.

5.3 – ENSAIOS DE IMPACTO DE BAIXA VELOCIDADE

5.3.1 – ENSAIO 5J

Classe A

A Figura 46 e a Tabela 16 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo A testado com uma energia de impacto de 5J.

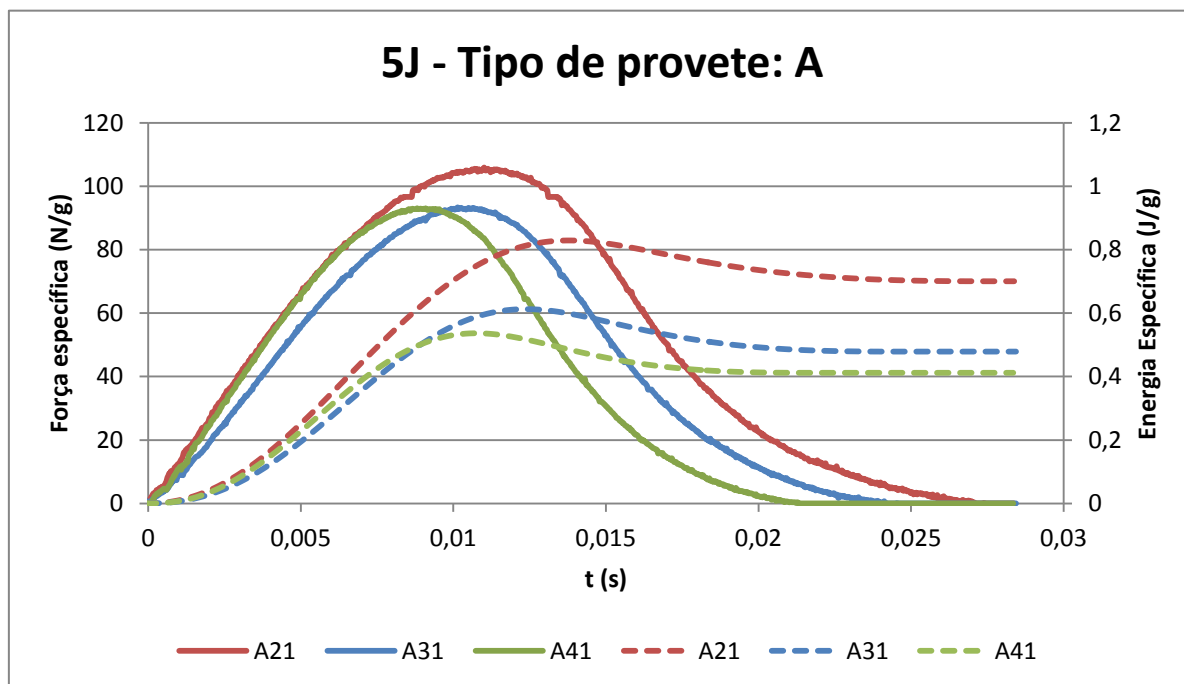


Figura 46 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 16 - Sumário do ensaio de 5J-A

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
A21	6,7	709,5	5,6
A31	9,0	840,0	5,5
A41	10,1	935,1	5,4

Como é possível visualizar, em termos de forma, as três curvas de força específica são bastante regulares. De facto, os provetes A31 e A41 apresentam curvas de forma semelhante, sendo que a curva que se destaca é a do provete A21 por apresentar uma força específica superior e uma curva mais extensa ao longo do tempo. Estes dois pontos são relevantes pois uma curva mais extensa pode indicar que a absorção de energia é conseguida num maior período de tempo, o que pode prevenir o aparecimento de acelerações indesejáveis fruto do impacto.

Em termos energéticos, o provete mais leve (A21) também apresenta maior índice de absorção de energia específica, o que significa que cada provete de cortiça aglomerada absorve 0,7J, por unidade de massa, enquanto os provetes do tipo A31 e A41 registaram, respetivamente, 0,5J/g e 0,4J/g.

De referir, de resto, que a energia de ensaio foi alcançada por todos os provetes, sendo que a deformação causada por este ensaio é insignificante, como se pode visualizar na Figura 47. Uma vez que a energia de ensaio é reduzida, os danos causados não são consideráveis e a viscoelasticidade da cortiça consegue, ao fim de pouco tempo, recuperar a totalidade da deformação gerada.



Figura 47 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 5J

Em suma, não há conclusões significativas a retirar deste ensaio, devido ao baixo nível energético. Para esta gama de energia, o provete cuja performance é mais adequada é o A21 porque concilia menor densidade à resistência necessária para um impacto de 5J.

Classe B

A Figura 48 e a Tabela 17 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo B testado com uma energia de impacto de 5J.

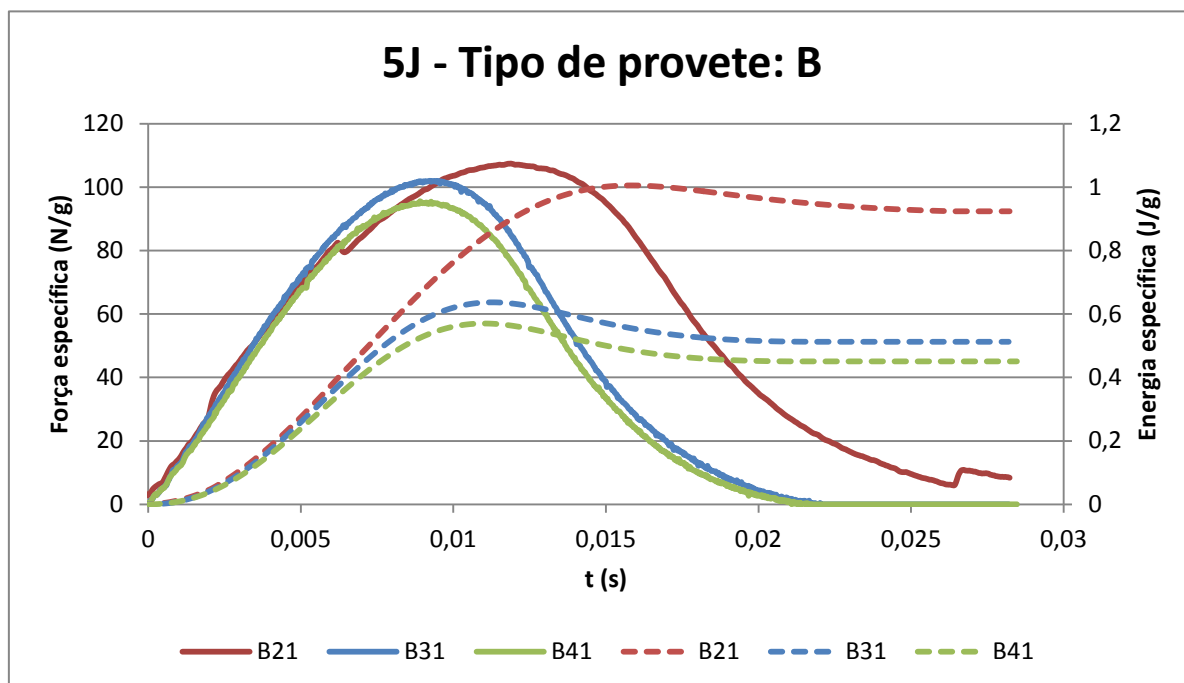


Figura 48 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 17 - Sumário do ensaio de 5J-B

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
B21	5,5	588,6	5,5
B31	8,7	883,1	5,5
B41	9,5	905,9	5,4

Tal como na análise anterior, as curvas resultantes do ensaio prático são bastante regulares e semelhantes na sua forma. Novamente, a curva que atinge um valor superior de força e energia específica é a do provete B21 (menos densa), atingindo cerca de 110 N/g e 0,9 J/g. Comparativamente às restantes, esta curva é também a mais extensa em termos de tempo de impacto, o que representa um aspeto positivo pelas razões anteriormente apontadas.

As curvas dos provetes B31 e B41, por se tratar de um ensaio de baixo nível de energia e, principalmente, devido à massa superior dos seus provetes, apresentam níveis de absorção de energia específica inferiores. Em termos de $E_{m\acute{a}x}$, o nível energético do ensaio foi alcançado e absorvido por todos os provetes. Novamente, como é possível verificar na imagem Figura 49, o dano provocado aos provetes é residual.



Figura 49 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 5J

Por fim, também para a classe B e, dado que a energia de ensaio é baixa (5J), todos os provetes cumprem os requisitos pretendidos sem deformações associadas, sendo que, naturalmente, o provete mais leve (B21) apresenta melhor índice de força e energia específica devido à sua massa inferior.

Classe M

A Figura 50 e Tabela 18 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo M testado com uma energia de impacto de 5J.

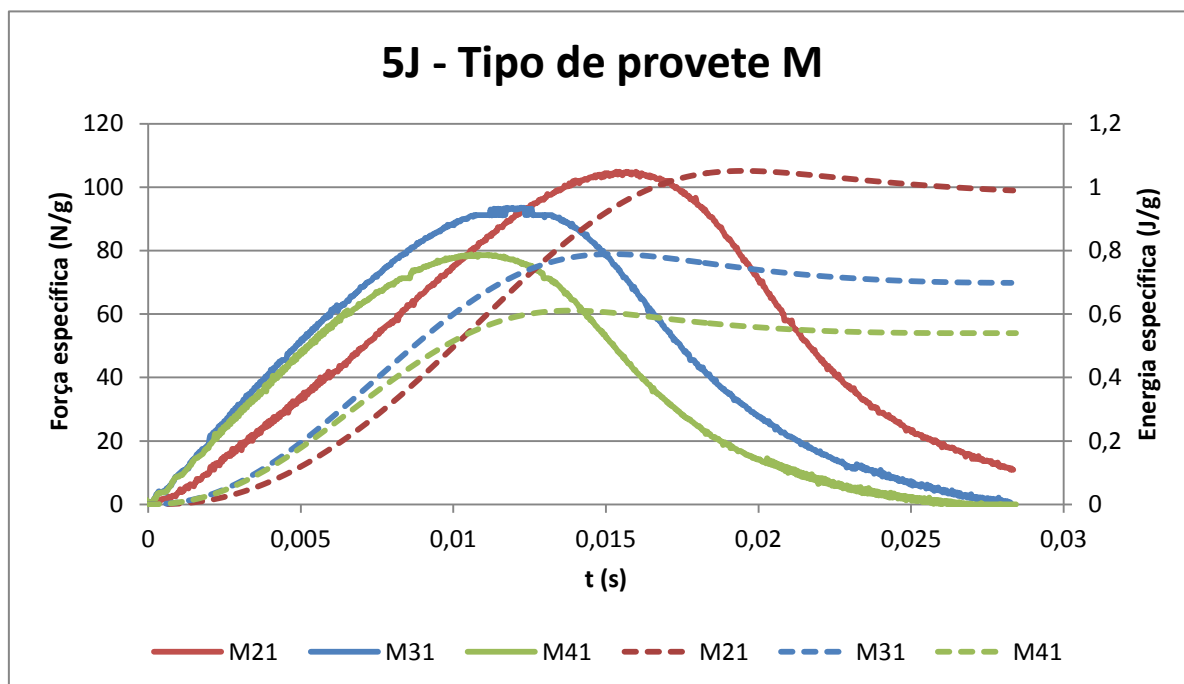


Figura 50 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 18 - Sumário do ensaio de 5J-M

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
M21	5,6	584,1	5,9
M31	7,1	663,9	5,6
M41	9,1	715,9	5,5

Em concordância com os provetes do tipo A e B, as curvas dos núcleos de cortiça M também apresentam uma forma regular e semelhante entre as diferentes taxas de compactação. O provete M21 é, mais uma vez, aquele que apresenta índices de força e energia específica mais elevados, fundamentalmente por ser um ensaio de baixa energia e por ter menor massa. Adicionalmente é, também, a curva mais longa em função do tempo. Em termos numéricos, a curva do provete M21 apresenta uma força máxima específica de cerca de 100 N/g e 1 J/g em termos de energia máxima específica. Em contrapartida, os valores de M31 e M41 (90 N/g; 0,7 J/g e 80 N/g; 0,55 J/g, respetivamente) são inferiores.

Em termos de $E_{m\acute{a}x}$, o nível energético do ensaio foi alcançado e absorvido por todos os provetes. Como é possível verificar na Figura 51, o dano provocado aos provetes continua a ser mínimo, embora mais perceptível em comparação com as duas classes anteriores.



Figura 51 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 5J

Tal como nas análises anteriores, o provete com melhor desempenho nesta gama de energia continua a ser a classe mais leve (M21), pelas razões apontadas anteriormente.

5.3.2 – ENSAIO 25J

Classe A

A Figura 52 e a Tabela 19 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo A testado com uma energia de impacto de 25J.

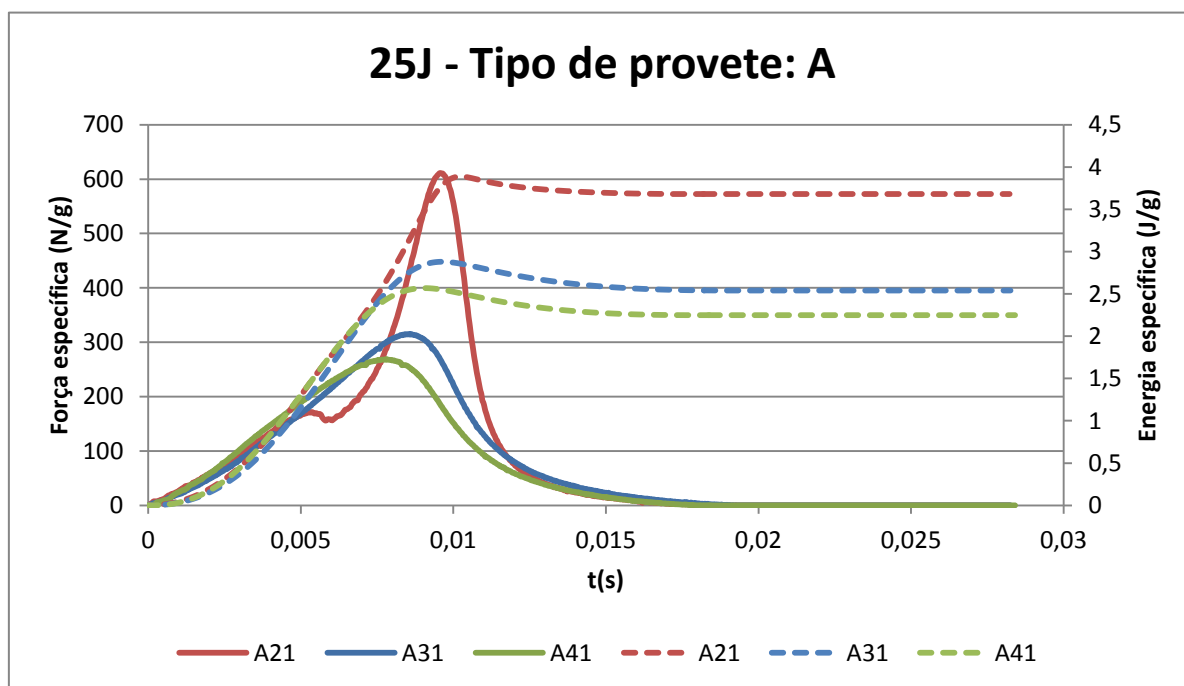


Figura 52 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 19 - Sumário do ensaio de 25J-A

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
A21	6,7	4095,0	26,0
A31	9,0	2838,2	25,9
A41	10,1	2706,4	25,8

O ensaio de 25J representa um aumento da energia de ensaio considerável, relativamente ao ensaio de 5J e isso é visível no gráfico Fe-Ee(t). A forma da curva de força específica deixou de ser regular e semelhante entre os diferentes provetes da classe A. Na verdade, as curvas dos provetes A31 e A41 continuam próximas uma da outra (300N/g; 2,5J/g e 280N/g; 2,25J/g, respetivamente), sendo que a grande diferença encontra-se na resposta do provete A21.

Em termos gráficos, o provete A21 continua a apresentar a curva mais alta relativamente à força específica e à energia específica: 600N/g e 3,75J/g, aproximadamente. No entanto, a

curva deixou de ser claramente a mais extensa em relação ao tempo de ensaio, não havendo diferença significativa para as curvas A31 e A41 que se registou no ensaio a 5J.

Como representado na Figura 53, o núcleo A21 sofreu uma deformação irreversível, sendo possível ver um esmagamento considerável no topo do provete. Os restantes provetes não apresentam nenhum registo de dano visível macroscopicamente.



Figura 53 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 25J

Outro aspeto interessante de registo é o aumento do declive da curva de força específica do provete A21, $t \approx 0,006s$, sendo que o declive das curvas dos provetes A31 e A41 permanece constante. Uma possível explicação para o aumento de rigidez específica reside na curva de compressão da cortiça, referida anteriormente em 3.7. Ao entrar na fase de densificação do material (esmagamento das células), as paredes celulares, que já sofreram encurvadura plástica, são adicionalmente comprimidas, havendo cada vez mais contactos, o que origina um aumento da rigidez da cortiça (tenderá, no limite, para a rigidez do material das paredes celulares).

Sucintamente, todos os provetes alcançaram a energia de ensaio, tendo o provete A21 absorvido esta energia à custa de uma deformação plástica moderada. Ainda assim, para esta gama de energia, a utilização deste núcleo continua a ser viável.

Classe B

A Figura 54 e Tabela 20 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo B testado com uma energia de impacto de 25J.

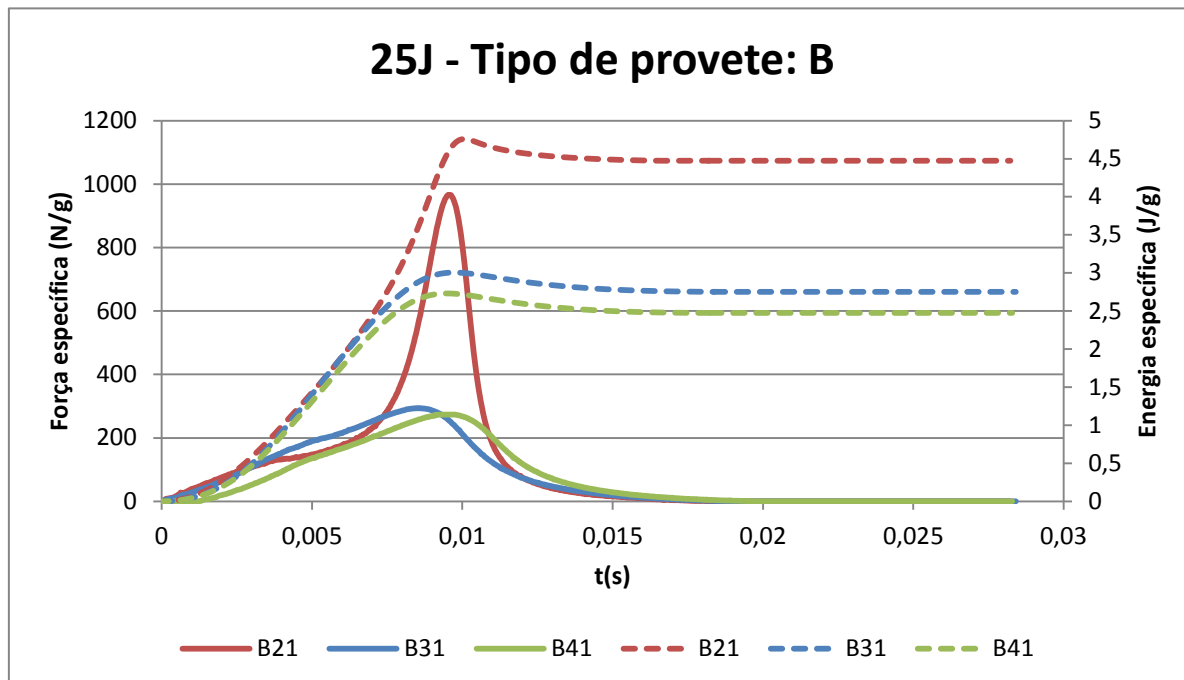


Figura 54 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 20 - Sumário do ensaio de 25J-B

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
B21	5,5	5296,2	26,1
B31	8,7	2546,7	26,0
B41	9,5	2592,3	25,9

Os resultados obtidos na curva Fe-Ee (t) dos núcleos da classe B são bastante idênticos com os resultados dos núcleos da classe A para uma energia de impacto de 25J. Isto é, apesar das curvas dos provetes B31 e B41 continuarem próximas uma da outra (300N/g; 2,75J/g e 280N/g; 2,5J/g), a curva do provete B21 apresenta algumas diferenças relativamente ao ensaio de 5J.

Em termos gráficos, verifica-se que a curva do provete B21 apresenta um pico de força específica bastante mais elevado, o que também se aplica à energia específica absorvida: 950N/g e 4,5J/g. À semelhança do homólogo A21, esta curva tornou-se mais curta relativamente ao tempo de ensaio.

A Figura 55 apresenta a deformação associada aos três provetes. O provete B21 sofreu um esmagamento irreversível no topo; no entanto, a cavidade formada é de menor dimensão comparativamente à provocada em A21. O provete B31 revelou pequenas fissuras ao longo do contorno de grão no seu topo, acompanhada por uma depressão reduzida. Por último, o topo do provete B41, ao contrário de A41 que não apresentava nenhuma deformação visível, regista pequenas fissuras ao longo do contorno de grão sem depressão do topo.



Figura 55 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 25J

O fenómeno de aumento de rigidez específica para o núcleo B21 também se verifica, pelas mesmas razões que foram apontadas anteriormente para o provete A21. De registar, apenas, que este incremento acontece ligeiramente mais tarde, para $t \approx 0,0075$.

Por fim, os provetes alcançaram a energia de ensaio, sendo que todas as amostras apresentaram deformação irreversível. O provete B21, que foi o mais deformado devido à sua massa inferior, continua a ser o mais viável.

Classe M

A Figura 56 e Tabela 21 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo M testado com uma energia de impacto de 25J.

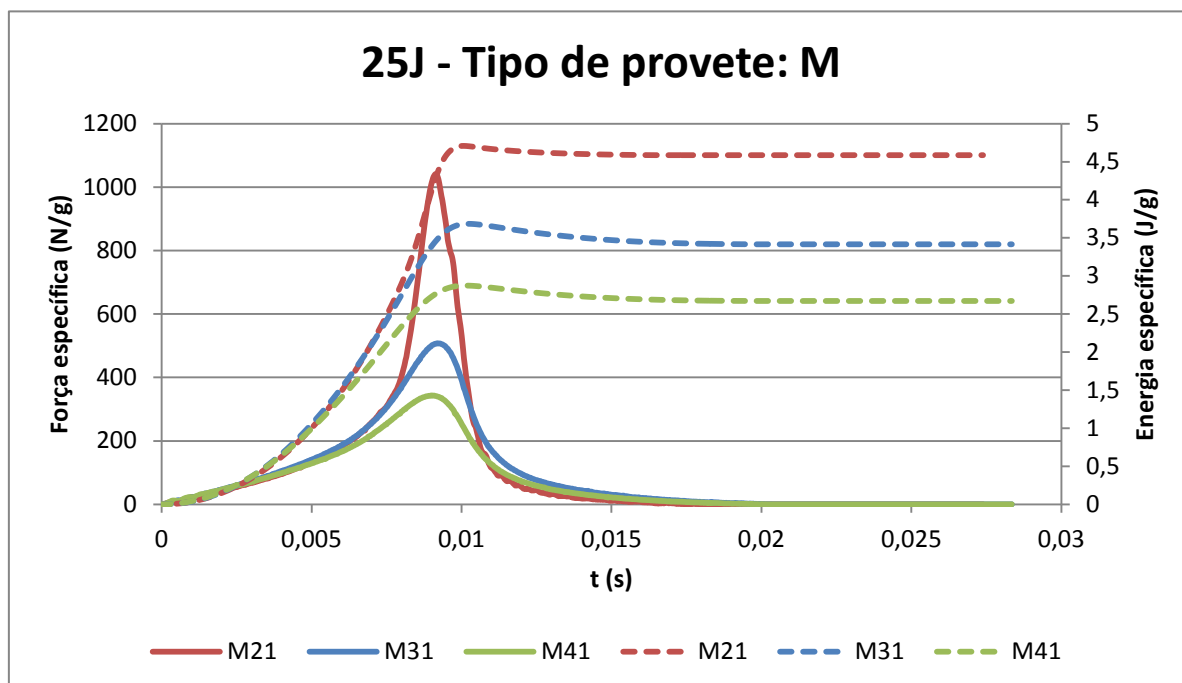


Figura 56 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 21 - Sumário do ensaio de 25J-M

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
M21	5,6	5797,9	26,2
M31	7,1	3603,4	26,2
M41	9,1	3116,9	26,1

A forma das curvas Fe-Ee (t) para os três provetes da classe M estão em conformidade com as curvas homólogas da classe A e B. No entanto, regista-se um aumento de força específica e energia específica nas diferentes taxas de compactação: o provete M21 apresenta um pico de força específica mais elevado (1000N/g), sendo que a energia específica obtida é semelhante à do provete B21 (4,5J/g); também para os núcleos M31 e M41 se verifica um ligeiro aumento nos valores obtidos (500N/g; 3,5J/g e 375N/g; 2,75J/g, respetivamente). Acrescentar, ainda, que a curva se tornou mais curta no intervalo de tempo.

O aumento de rigidez específica, provocado pelas razões enumeradas acima, também está especialmente destacado no provete M21, sendo que a curva M31 também aumenta

ligeiramente de declive, parecendo estar no limite da densificação da cortiça. Por sua vez, o provete M41 não apresenta aumento de rigidez considerável.

A Figura 57 mostra a deformação provocada pelo ensaio nos três provetes. É possível verificar que a deformação causada em M21 é semelhante a A21 (ou seja, o esmagamento neste provete é considerável e superior a B21), sendo que o topo de M31 e M41 revela uma pequena depressão, não relevante.



Figura 57 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 25J

Em suma, os provetes continuam a conseguir absorver a energia do ensaio totalmente, com deformação visível em todas as amostras. O provete mais leve, M21, continua a cumprir os requisitos propostos, continuando a indicado para esta gama de energia.

5.3.3 – ENSAIO 40J

Classe A

A Figura 58 e a Tabela 22 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo A testado com uma energia de impacto de 40J.

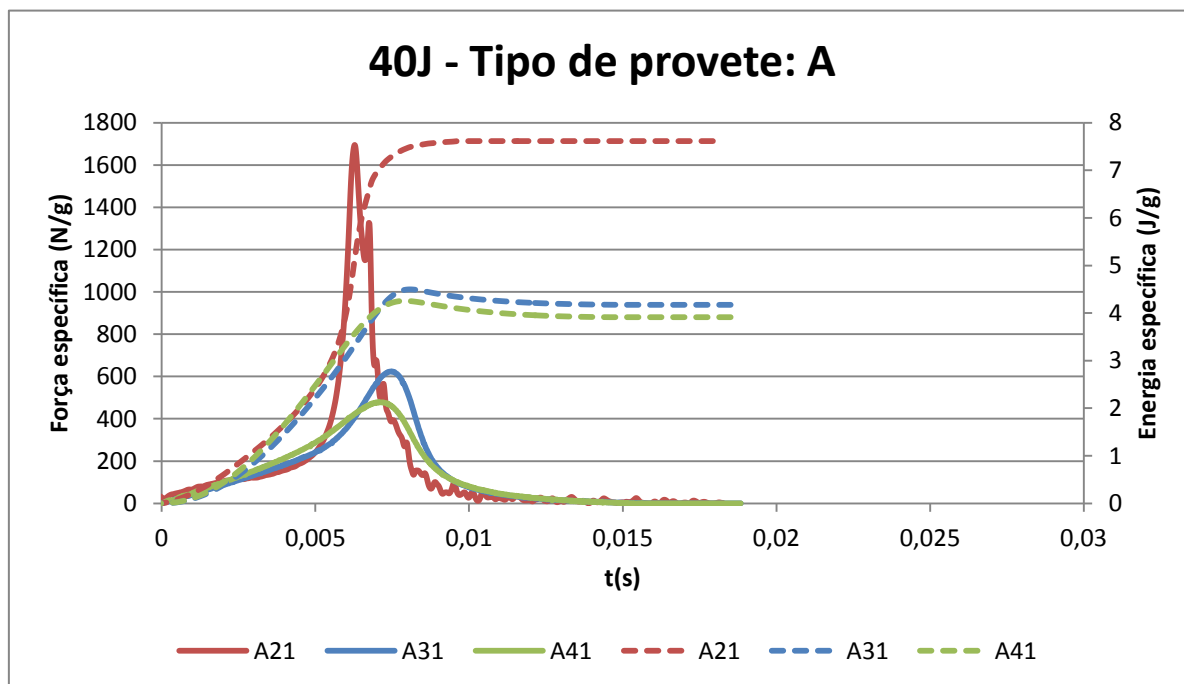


Figura 58 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo A ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 22 - Sumário do ensaio de 40J-A

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
A21	5,3	8915,8	40,1
A31	9,1	5686,4	41,0
A41	9,6	4601,9	40,9

A curva Fe-Ee (t) apresenta algumas diferenças sobretudo na forma da curva de força específica do provete A21 tornando-se bastante irregular: a presença de “ruído” pode indicar um novo modo de deformação do provete. O pico de força específica e energia específica máxima continua associado à classe A21 (1700N/g e 7,5J/g, respetivamente), refletindo uma subida considerável face à gama anterior de energia; para as classes A31 e A41, a forma das curvas mantém-se regular, apesar de um aumento ligeiro dos valores de força específica (600N/g; 4,25J/g e 450N/g; 4J/g, respetivamente). Nota-se, mais uma vez, o aumento de

rigidez específica especialmente no provete A21, mas também em A31, pelas razões apontadas anteriormente. No caso de A41, este aumento de rigidez não é tão visível, pelo que seria necessário realizar um novo ensaio para aferir a energia mínima necessária para avaliar o fenómeno da densificação.

O topo dos provetes ensaiados é apresentado na Figura 59. É possível ver que o provete A21, cuja curva de força específica apresentava um ruído considerável, apresenta uma deformação diferente dos provetes analisados anteriormente. Ao contrário dos casos já referidos, o dano causado não se restringiu à parte central do provete (onde ocorreu o embate do impactor), tendo a deformação originado uma fissura que se alastrou na direção radial do núcleo de cortiça, o que provocou a desintegração de grande parte do provete. Por outro lado, os provetes A31 e A41 apresentam apenas uma deformação superficial, criando uma pequena depressão no topo do núcleo de cortiça com a presença de poucas fissuras ao longo dos contornos de grão.



Figura 59 - Deformação gerada nos provetes do tipo A ensaiados a 40J

Apesar da desintegração parcial de A21, todos os provetes conseguiram alcançar o nível de energia do ensaio, sendo a energia totalmente absorvida para os três casos. Como a estrutura do provete não foi completamente destruída, considera-se que A21 cumpre os requisitos pretendidos para esta gama de energia e, sendo o provete mais leve, aceita-se a sua escolha como solução plausível para este nível de energia.

Classe B

A Figura 60 e Tabela 23 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo B testado com uma energia de impacto de 40J.

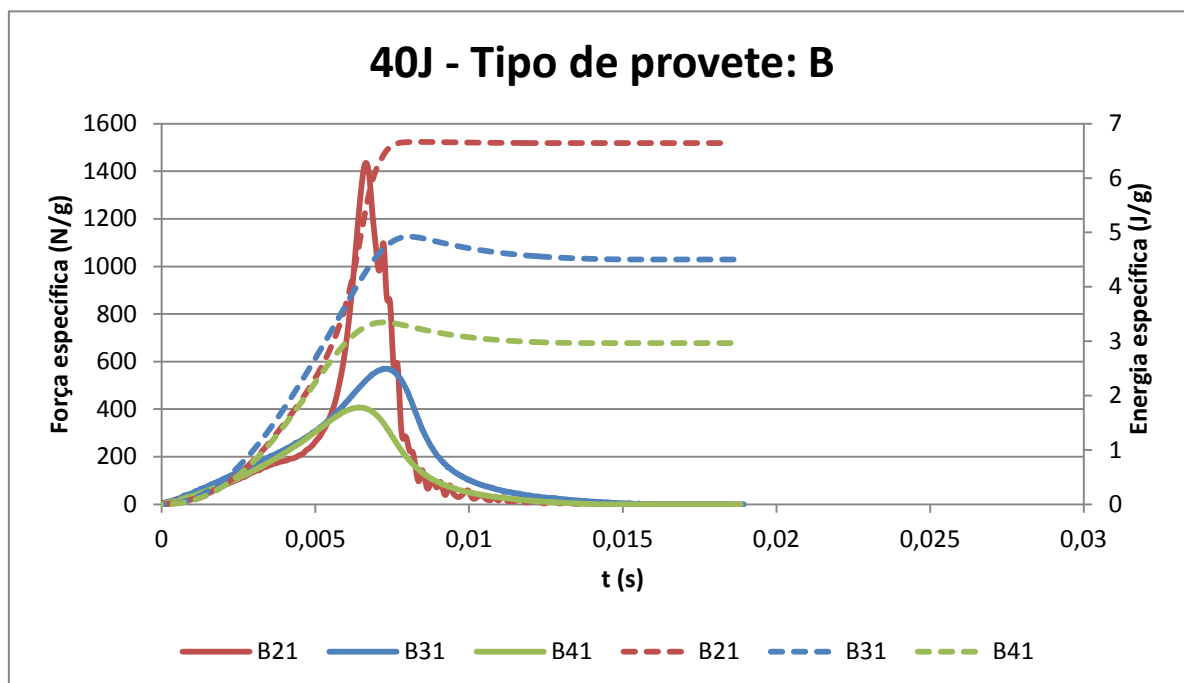


Figura 60 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo B ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 23 - Sumário do ensaio de 40J-B

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
B21	6,2	8896,2	41,3
B31	8,31	4738,7	40,9
B41	12,2	4966,8	40,8

A forma do gráfico Fe-Ee (t) dos provetes do tipo B é bastante similar ao tipo A, em que a curva B21 regista o máximo de força específica (1400N/g) e o máximo de energia específica (6,5J/g). Também na curva de força específica é possível ver a presença de algum “ruído”. Relativamente às classes B31 e B41, a forma das curvas mantém-se regular, apesar de um aumento ligeiro dos valores de força específica (580N/g; 4,5J/g e 400N/g; 3J/g, respetivamente) em comparação ao ensaio de 25J. O aumento de rigidez específica continua a ser visível, especialmente no provete B21, mas também em B31, pelas razões discutidas anteriormente. Tal como no caso anterior, em B41 este aumento de rigidez não é tão visível, pelo que seria interessante subir o nível energético do ensaio para avaliar o fenómeno da densificação.

Ao analisar as imagens ao nível do dano no topo dos provetes do tipo B (Figura 61) verifica-se que, apesar das curvas Fe-Ee (t) serem semelhantes, há algumas alterações

comparativamente aos provetes da classe A. O núcleo B21, ao contrário do que seria esperado pelo pico elevado de força específica e, também, pela presença de “ruído” na curva, não apresenta uma deformação elevada como o homólogo A21. A deformação é caracterizada por uma depressão ligeira no centro da face superior do provete, com fissuras na região circundante. De facto, a desintegração deste provete parece estar ainda distante, sendo a deformação gerada semelhante ao provete B21 testado a 25J. Por sua vez, B31 apresenta uma pequena deformação irreversível no topo, à imagem do provete da mesma classe testado a 25J, registando-se uma depressão no centro com fissuração na zona envolvente, ao longo do contorno de grão. Já o provete B41 não apresenta nenhuma deformação aparente, possivelmente por se tratar de um núcleo com 12,2g, o que representa um aumento significativo de massa comparativamente aos provetes da mesma categoria.



Figura 61 - Deformação gerada nos provetes do tipo B ensaiados a 40J

Em suma, todos os provetes conseguiram absorver a energia descarregada durante o ensaio. O nível de dano do provete B21 foi surpreendente uma vez que a estrutura do provete não se desintegrou, ao passo que A21, para a mesma energia, foi desagregado. Naturalmente, B21 é seleccionado como a melhor solução desta classe, uma vez que este apresenta a menor massa e cumpre os requisitos de absorção de energia a 40J.

Classe M

A Figura 62 e Tabela 24 mostram, respetivamente, a evolução da força específica e energia específica ao longo do tempo, assim como os resultados de valor para o ensaio do núcleo de cortiça do tipo M testado com uma energia de impacto de 40J.

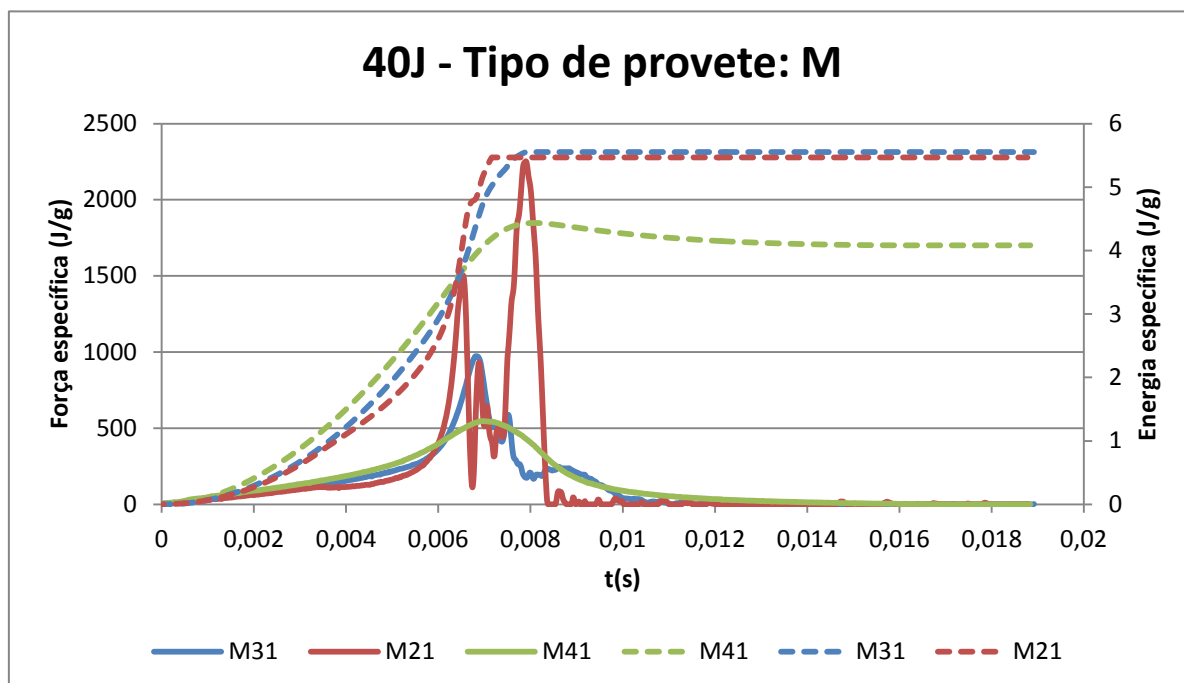


Figura 62 - Curva Fe-Ee (t) dos provetes tipo M ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.

Tabela 24 - Sumário do ensaio de 40J-M

Designação do provete	Massa (g)	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$E_{m\acute{a}x}$ (J)
M21	5,0	7485,6	27,4
M31	6,6	6441,6	36,8
M41	9,2	5047,9	40,9

O gráfico Fe-Ee (t) da classe M apresenta um formato bastante irregular para os provetes M21 e M31, enquanto a curva do provete M41 permanece idêntica aos provetes anteriormente estudados.

A curva do provete M21 apresenta muito ruído e dois picos evidentes de força específica, com um declive exagerado para este tipo de material. Uma possível justificação para este acontecimento prende-se com o facto de apenas o primeiro pico ser referente ao provete em si, sendo o segundo pico resultado do embate do impactor com o suporte metálico da máquina de ensaio. Por outras palavras, o provete destruiu-se completamente, sendo a energia de ensaio superior à capacidade de absorção de energia do núcleo M21. De facto, como se pode confirmar na Tabela 24, o limite de absorção de energia deste provete fixa-se nos 27,4 J, bastante abaixo da energia de impacto de 40J.

O provete M31 apresenta um comportamento semelhante ao M21. Apesar da sua curva de força específica ser inferior à curva M21 e apresentar menos “ruído”, o nível de energia descarregado durante o ensaio não foi suportado pelo provete, sendo a sua capacidade máxima de absorção de energia fixada em 36,8J (Tabela 24).

Relativamente ao provete M41, a sua curva permanece idêntica aos provetes anteriormente estudados, sendo o máximo de força específica de 500 J/g e o máximo de energia específica de 4 J/g. A energia de impacto de 40J é absorvida na totalidade.

Através da análise da Figura 63, é possível verificar que os provetes M21 e M31 se desintegraram completamente, enquanto M41 não apresenta dano considerável.



Figura 63 - Deformação gerada nos provetes do tipo M ensaiados a 40J

Em suma, o único provete que cumpre os requisitos do ensaio é o M41, visto que os restantes não apresentam capacidade de absorção de energia suficiente para impactos de 40J.

5.3.4 – CLASSE A, B e M

Nesta secção, serão expostos gráficos de força e energia específica para os provetes que apresentaram melhores resultados de cada uma das classes.

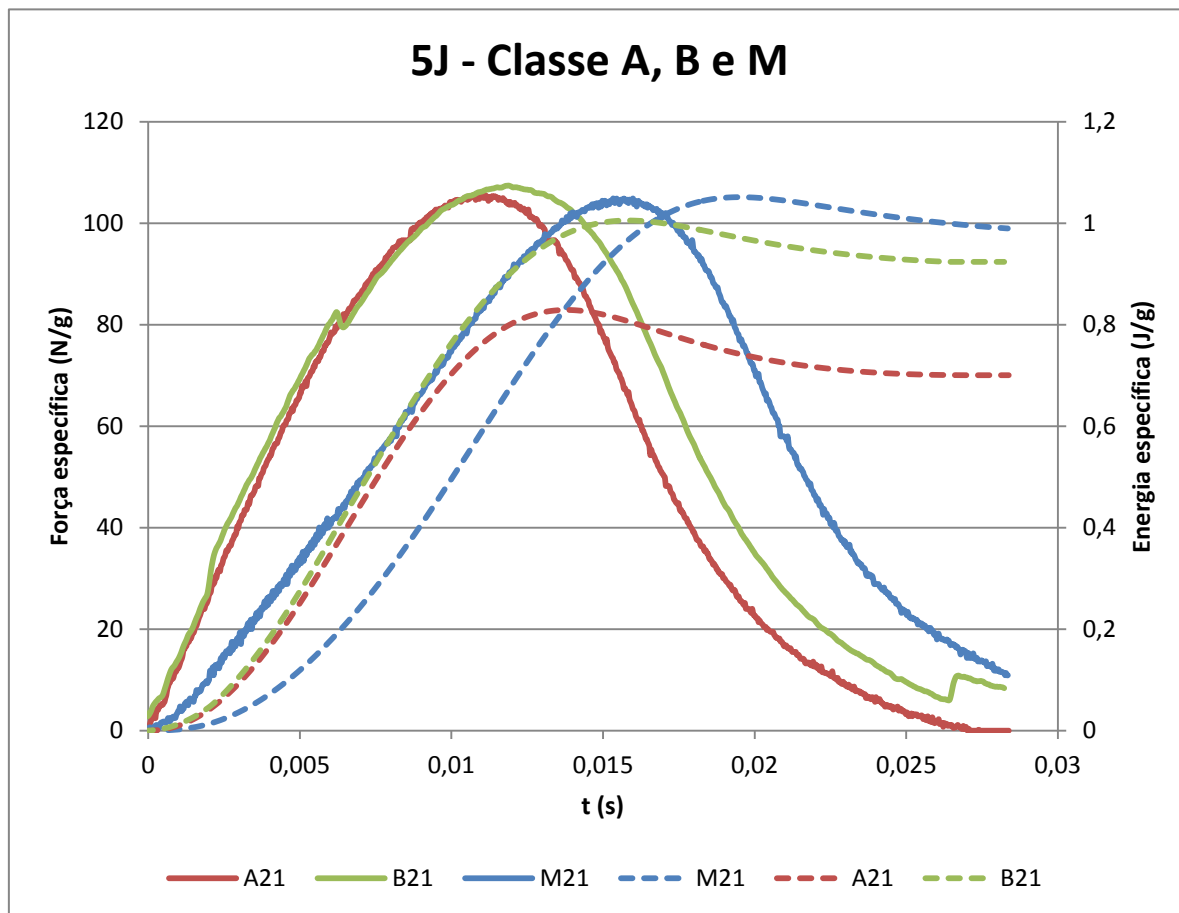


Figura 64 - Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M21 ensaiados a 5J: (-) força específica; (...) energia específica.

A Figura 64 mostra que as três curvas de força específica são bastante próximas. Isto deve-se ao facto do ensaio ser de baixa energia, sendo que nenhum dos provetes apresentou deformação considerável.

Apesar de a curva do provete B21 apresentar um pico de força específica ligeiramente superior, a diferença não é relevante.

Em termos de energia específica, o provete M21 consegue absorver mais energia por unidade de massa em comparação com os restantes núcleos. De facto, B21 apresenta uma capacidade relativamente próxima de M21, sendo que A21 mostra uma absorção de energia por unidade de massa consideravelmente inferior.

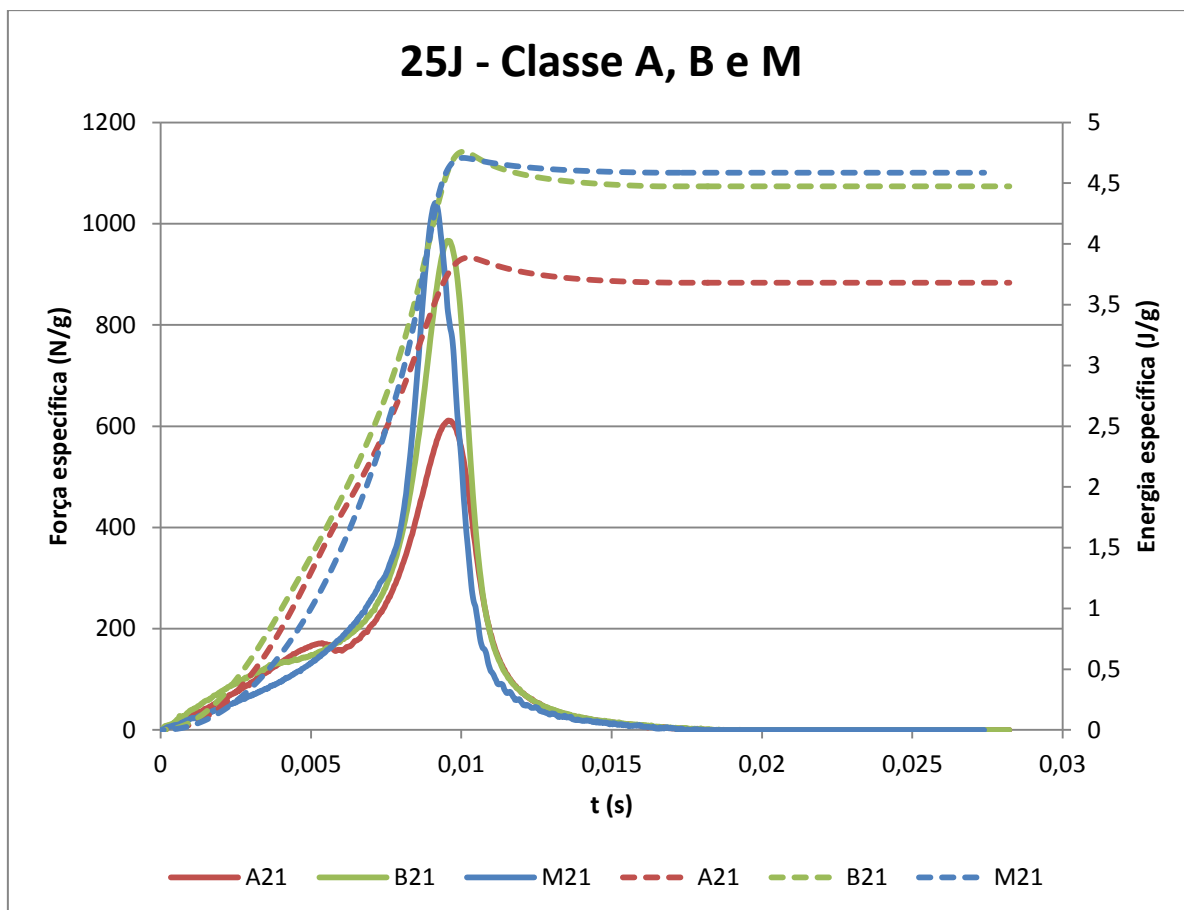


Figura 65 - Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M21 ensaiados a 25J: (-) força específica; (...) energia específica.

A Figura 65, relativa ao ensaio de 25J, já apresenta algumas diferenças em termos de força específica máxima para as três classes. Apesar das curvas serem todas elas similares na sua forma, a força específica máxima de A21 é muito inferior em comparação com B21 e M21, cujos valores são bastante próximos.

A energia específica absorvida pelo provete A21 é, também, inferior à dos provetes B21 e M21 que, mais uma vez, apresentam valores bastante próximos.

Por fim, a deformação provocada pelo impacto é relativamente idêntica para os provetes A21 e M21 que, em relação a B21, apresentam um dano superior.

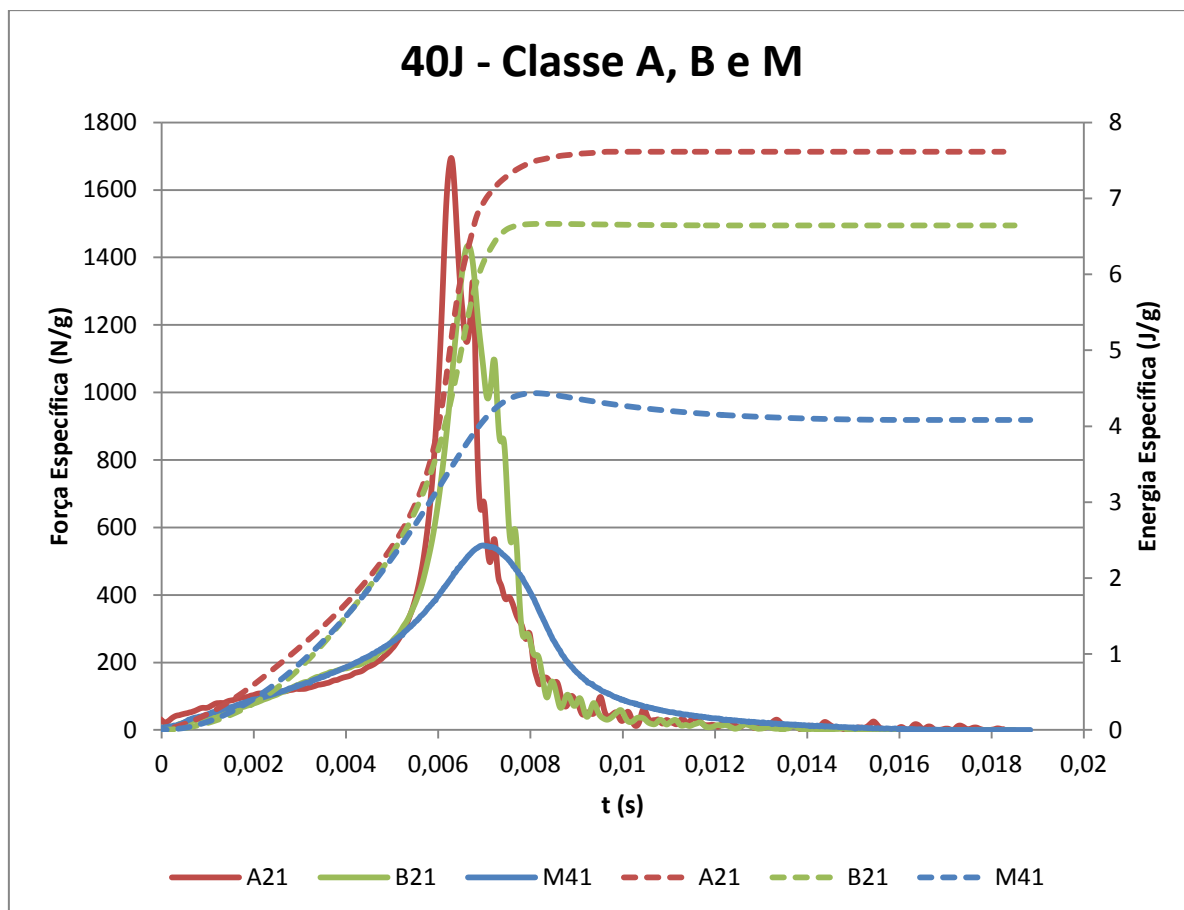


Figura 66 – Curva Fe-Ee(t) dos provetes A21, B21 e M41 ensaiados a 40J: (-) força específica; (...) energia específica.

O ensaio de 40J, Figura 66, expõe alguns pontos que são objetivo de discussão. Em primeiro lugar, o provete com menor densidade da classe M não apresentou o nível de absorção de energia requerido pelo ensaio, pelo que o termo de comparação possível é o núcleo M41. Sendo assim, devido à maior massa do provete, a curva do provete M41 de força e energia específica é consideravelmente inferior relativamente à dos provetes A21 e B21.

Apesar das diferenças não serem muito acentuadas, o provete A21 registou um máximo de força específica superior em relação a B21, sendo que a sua energia específica absorvida é igualmente maior.

No entanto, a deformação consentida pelos dois provetes é bastante diferente. Enquanto A21 praticamente se desintegrou, o que indica que a sua capacidade máxima de absorção de energia está próxima, o dano causado em B21 é apenas moderado (apresenta fissuras intergranulares de pequena dimensão à volta da zona central do provete que sofreu uma depressão).

6 – CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHO FUTURO

O objetivo principal deste trabalho consiste em estudar a capacidade de absorção de energia de aglomerados de cortiça, submetidos a ensaios de impacto de baixas velocidades, em sistemas de segurança passiva, nomeadamente capacetes rodoviários. Esta investigação surge no seguimento de um trabalho realizado na cadeira de desenvolvimento de produto e empreendedorismo realizados pelo autor e de estudos numéricos realizados neste âmbito, que justificavam o interesse deste material mas que apontam como principal limitação da cortiça a sua elevada densidade, o que resulta numa maior inércia e, em determinadas circunstâncias, maiores acelerações gravitacionais no capacete.

Numa primeira fase, estudou-se a possibilidade de reduzir a densidade da cortiça, recorrendo a um processo de expansão através da exposição do material à radiação micro-ondas. Apesar do estudo ter sido realizado em conformidade com o processo citado, os resultados obtidos não produziram a expansão esperada, pelo que a densidade da cortiça permaneceu inalterável. No que diz respeito a este ponto, conclui-se que o processo aparenta não ser viável.

De forma a contornar o insucesso obtido na expansão da cortiça, foi projetado um molde que permite variar a razão de compactação na produção dos provetes. O objetivo consiste na produção de diferentes núcleos de cortiça aglomerada com várias gamas de densidades. Para isso, foram criadas três classes de provetes (A, B e M), em que cada classe compreende três razões de compactação: 2-1, 3-1 e 4-1.

A produção dos referidos núcleos revelou-se satisfatória, na medida em que foram obtidos provetes com densidades inferiores relativamente às estudadas anteriormente na literatura – 300kg/m^3 , baseadas na indústria rolheira. A compactação 2-1 permitiu a obtenção de provetes com densidades compreendidas entre $135\text{-}175\text{ kg/m}^3$; a compactação 3-1 obteve densidades entre $175\text{-}240\text{ kg/m}^3$; e a densidade dos provetes da compactação 4-1 fixou-se entre $240\text{-}320\text{ kg/m}^3$. De referir que a amplitude dos intervalos de densidade é mais elevada do que o ideal devido à natureza manual do processo produtivo. Contudo, algumas dificuldades foram sentidas durante esta etapa, especialmente na produção dos provetes da classe M (EPS + cortiça). A diferença entre as densidades dos dois materiais tornou inviável a homogeneização do provete, apesar de várias técnicas terem sido equacionadas.

A última fase do trabalho experimental consiste em submeter os provetes a ensaios de impacto de baixa velocidade. O intuito é avaliar a capacidade de absorção de energia de cada classe dos provetes, mantendo um compromisso entre resistência ao impacto e mínimo de densidade dos núcleos. Foram avaliadas três energias de impacto diferentes: baixa (5J), média (20J) e alta (40J), que representa a capacidade máxima da máquina de ensaios. A maior dificuldade sentida foi efetuar a ligação entre os resultados obtidos e uma situação real de impacto (limite de energia de um acidente de viação desconhecido), assim como a determinação dos níveis de HIC e aceleração máxima obtida.

O ensaio de impacto a baixas velocidades permitiu retirar algumas conclusões:

- A presença de 30% (em volume) de EPS nos núcleos de cortiça não se revelou vantajosa, isto é, não resultou num aumento de resistência ao impacto dos provetes. A capacidade máxima de absorção de energia dos provetes da classe M fixou-se, sensivelmente, nos 27J e 37J (2-1 e 3-1, respetivamente), sendo que apenas M41 resistiu ao ensaio de 40J.
- Todas as classes A e B (só cortiça aglomerada) conseguiram absorver a totalidade da energia de impacto máxima (40J);
- Não se verificaram diferenças consideráveis entre a classe A e B em termos da capacidade de absorção de energia para o ensaio de 40J. Na prática, a classe B (que contém grãos mais finos) parece ser mais vantajosa, possivelmente, devido à estratificação dos grãos de cortiça na moldação visto que, apesar de ambos os provetes A21 e B21 terem absorvido a totalidade da energia de impacto, o nível de dano do provete B21 foi menor;
- A utilização de cortiça com granulometria mais fina contribui para a produção de aglomerados de menor densidade;
- À medida que a densidade dos provetes baixa, também diminui a resistência dos núcleos à penetração do impactor, o que contribui para grandes deformações dos provetes de menor densidade.
- O efeito da viscoelasticidade da cortiça é visível para baixas energias de impacto, sendo uma grande parte da deformação recuperada quase instantaneamente após o ensaio;

Em jeito auto crítico, este trabalho não relaciona diretamente a energia dos ensaios realizados com a energia real em caso de impacto num acidente rodoviário. No entanto, ficou provado que é possível desenvolver núcleos de aglomerado de cortiça consistentes com baixa densidade (135-175 kg/m³), que é mais próxima da densidade de EPS utilizada em capacetes rodoviários.

Proposta de Trabalhos Futuros

Ao longo da realização do trabalho experimental, foram surgindo várias hipóteses de estudo que poderia conduzir à obtenção de resultados adicionais de forma a aferir as potencialidades da cortiça como material de absorção de impacto.

- Introdução de uma classe de provetes com composição 100% EPS para facilitar a comparação de resultados.
- Adicionar um laminado no topo dos núcleos de cortiça e caracterização do seu comportamento em ensaios de impacto de baixa velocidade, considerando também a força e energia absorvida em função da distância de penetração do impactor.
- Aumentar o nível de energia máximo do ensaio de impacto de baixa velocidade, levando à falha dos núcleos testados, o que permitiria uma caracterização mais eficaz dos seus limites de capacidade de absorção de energia.

REFERÊNCIAS

1. Gonçalves, D.F.d.S., *Segurança passiva de capacetes rodoviários utilizando novos materiais*, in *Engenharia Mecânica* 2009, Universidade de Aveiro.
2. Coelho, R., *Desenvolvimento de sistemas de protecção passiva com recurso a materiais celulares*, in *Departamento de Engenharia Mecânica* 2010, Universidade de Aveiro.
3. Gurdjian, E.S., *Impact head injury: mechanistic, clinical, and preventive correlations*. 1975: Thomas Publisher, Limited, Charles C. 388.
4. Maartens, N.F., C.B.T. Adams, and A.D. Wills, *Lawrence of Arabia, Sir Hugh Cairns, and the Origin of Motorcycle Helmets*. 2002.
5. Shoei, *Shoei Technical Book*, 2008. p. 6/7.
6. Shuaieb, F.M., et al., *Motorcycle helmet: Part II. Materials and design issues*. Journal of Materials Processing Technology, 2002. **123**(3): p. 422-431.
7. Caserta, G.D., L. Iannucci, and U. Galvanetto, *Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner*. Composite Structures, 2011. **93**(11): p. 2748-2759.
8. Brands, D., *Development and validation of a finite element model of a motorcycle helmet*, 1996, Ph. D. dissertation, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
9. Mills, N.J.G.A., *The effectiveness of foams in bicycle and motorcycle helmets*. Accident analysis and prevention., 1991. **23**(2/3).
10. Gilchrist, A.M.N.J., *Deformation analysis for motorcycle helmets*. 1993.
11. Chia-Yuan Chang, C.-H.H., San-Yi Chang, *Design of a Helmet*, 2003.
12. Bednar, F.B., J W McRea, K Sabol, S A Syner, J THOM, D R, *Motorcycle Safety*, 2000, Transportation Research Board.
13. Institution, B.S., *Specification for protective helmets for racing motorcyclists*, 1952, BSI.
14. Institute, A.N.S., *Standard for protective headgear - for motor vehicle users*, 1966.
15. FMVSS, *Motorcycle Helmets*, 2011, Federal Motor Vehicle Safety Standard.
16. ISO-R1511, *Protective helmets for road users*, 1970, International Standards Organisation.
17. 22, R., *Uniform provisions concerning the approval of protective helmets and of their visors for drivers and passengers of motorcycles and mopeds*, 2000, United Nations.
18. Bosch, H.L.A.v.d., *Crash Helmet Testing and Design Specifications*, 2006, Technische Universiteit Eindhoven.
19. nd. *Paralisiafacial*. nd; Available from: <http://paralisiafacial.com/paralisia-facial-ossos-da-face.html>.
20. nd. nd. 2010; Available from: <http://ensinodematemtica.blogspot.pt/2010/10/sistema-nervoso-sistemas-nervoso.html#!/2010/10/sistema-nervoso-sistemas-nervoso.html>.
21. Infoescola. Available from: <http://www.infoescola.com/sistema-nervoso/meninges/>.

22. Gray, H., P.L. Williams, and L.H. Bannister, *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Medicine and Surgery*. 1995: Churchill Livingstone.
23. Medicinanet. Available from: http://www.medicinanet.com.br/conteudos/revisoes/1175/trauma_de_cranio.htm.
24. Dias, C. and I. Maia, *Manual do Interno de Cuidados Intensivos*. 2008: Serviço de Cuidados Intensivos Hospital S. João.
25. nd. nd. Available from: <http://anatpat.unicamp.br/taneutrauma.html>.
26. Anatomical, L. nd; Available from: <http://legal-anatomical.medicalillustration.com/generateexhibit.php?ID=28556>.
27. H. R. Lissner, M.L., F. G. Evans, *Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure changes in man*. Surgery, Gynecology and Obstetrics. Vol. 111. 1960.
28. Gurdjian, E.S., *Quantitative determination of acceleration and intracranial pressure in experimental head injury*. Neurology. Vol. 3. 1953.
29. Gadd, C.W., *Use of a weighted-impulse criterion for estimating injury hazard*, 1966, SAE Technical Paper.
30. Slattenschek, A. and W. Tauffkirchen, *Critical evaluation of assessment methods for head impact applied in appraisal of brain injury hazard, in particular in head impact on windshields*, 1970, SAE Technical Paper.
31. NHTSA, *Occupant crash protection - Head Injury Criterion*, 1972, US Department of Transportation: FMVSS 208. p. Docket Number 69-7, Notice 17.
32. Holbourn, A., *Mechanics of head injuries*. The Lancet, 1943. **242**(6267): p. 438-441.
33. T. Gennarelli, L.T., G. Tomei, R. Wiser, D. Graham, and J. Adams., *Directional dependence of axonal brain injury due to centroidal and non-centroidal acceleration*, in *Proceedings of 31st Stapp Car Crash Conference* 1987. p. 49-53.
34. Tarriere, *Head and neck injury criteria: a consensus workshop*, Washington, D.C., March 26-27, 1981. 1983: U.S. Dept. of Transportation, NHTSA.
35. Linn, S., *The injury severity score—importance and uses*. Annals of epidemiology, 1995. **5**(6): p. 440-446.
36. Harold Fenner, J., Daniel J. Thomas, Thomas Gennarelli, Frank A. Pintar, Edward B. Becker, James A. Newman, Narayan Yoganandan, *Final Report of Workshop on Criteria for Head Injury and Helmet Standards*. 2005: Department of Neurosurgery, Medical College of Wisconsin.
37. Amorim, C. 2006; Available from: <http://www.investinportugal.pt/NR/rdonlyres/1A376D24-0F46-4B31-8002-3EF7F7A6200D/0/AntonioAmorim.pdf>.
38. Arteiro, A.J.C., *State-of-the-art: Sandwich Structures Applications in Impact Situations*, 2010, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 207.
39. Gameiro, C.P., *Capacidade de absorção de energia de impacto de estruturas tubulares com cortiça confinada - Estudo numérico e experimental*, in *Departamento de Engenharia Mecânica* 2007, Universidade de Coimbra.
40. RealCork, *Anuário APCOR 2009*, 2009.
41. APCOR/AIEC, *Anuário da indústria corticeira portuguesa 2000*, 2000.

42. Hooke, R., *Micrographia: Or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses, with Observations and Inquiries Thereupon*. 1665: Dover Publications.
43. Fortes, M.A., M.E. Rosa, and H. Pereira, *A cortiça*. 2004: Instituto Superior Técnico.
44. Pereira, H., *Composição química de raspa em pranchas de cortiça de produção amadia*. 1987. **587**: p. 231-233.
45. Pereira, H., *Chemical composition and variability of cork from Quercus suber L*. Wood science and technology, 1988. **22**(3): p. 211-218.
46. Silva, M.E.C.M.d., *A cortiça - Suas características e propriedades*, 2010, UTAD.
47. Graça, J.A.R., *Constituintes químicos da cortiça e outros tecidos suberosos*, 1990, Universidade Técnica de Lisboa.
48. Rosa, M.E. and M. Fortes, *Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork*. Journal of materials science, 1988. **23**(3): p. 879-885.
49. Natividade, J.V., *Subericultura*. 1950, Lisboa: Ministerio de Economía, Direcção Geral das Florestas.
50. Fonseca, F.M., J. Louzada, and M. Silva. *Crescimento e qualidade da cortiça. Potencialidades da microdensitometria*.
51. Rosa, M.E., *Verde da cortiça*, 1993, Relatório Final dos Estudos sobre Qualidade e Processamento da Cortiça.
52. Gibson, L., K. Easterling, and M. Ashby, *The structure and mechanics of cork*. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1981. **377**(1769): p. 99-117.
53. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. 1999: Cambridge university press.
54. Pereira, H.R., M. Emilia Fortes, M. A., *THE CELLULAR STRUCTURE OF CORK FROM QUERCUS SUBER L*. 1987.
55. Pina, P. and M.A. Fortes, *Characterization of cells in cork*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996. **29**(9): p. 2507.
56. Rosa, M.E. and M. Fortes, *Stress relaxation and creep of cork*. Journal of materials science, 1988. **23**(1): p. 35-42.
57. P. Pina, M.E.R.a.O.A., *Comportamento mecânico da cortiça em compressão e sua relação com a porosidade*. Actas do European conference on cork oak and cork, 1997: p. 317-325.
58. Fortes, M.A. and M.E. Rosa, *Compressão cíclica de cortiça*, in *Actas dos Materiais* 1987. p. 321-334.
59. Rosa, M. and M. Fortes, *Deformation and fracture of cork in tension*. Journal of materials science, 1991. **26**(2): p. 341-348.
60. Gil, A., et al., *An NMR microscopy study of water absorption in cork*. Journal of materials science, 2000. **35**(8): p. 1891-1900.
61. Gil, L., *Effect of hot pressing densification on the cellular structure of black agglomerated cork board*. Holz als Roh-und Werkstoff, 1994. **52**(2): p. 131-134.
62. Gil, L., *Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates*. Wood science and technology, 1996. **30**(3): p. 217-223.

63. Joao Teixeira, M., et al., *Influence of the wetting properties of polymeric adhesives on the mechanical behaviour of cork agglomerates*. Journal of adhesion science and technology, 1996. **10**(11): p. 1111-1127.
64. Nóvoa, P., et al., *Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates*. Composites science and technology, 2004. **64**(13): p. 2197-2205.
65. Silva, R.C.S.d.C., *Melhoria da resposta sísmica de um edifício com recurso a paredes de CorBe*. 2008.
66. Pereira, H.M.N., et al., *Process of cork pre-expansion by submission to microwave radiation and resulting product thereof*, 2009, Google Patents.
67. Riboulet, J.-M., *Aspects pratiques du bouchage des vins*. 1986: Collection Avenir Oenologie.